



**HAL**  
open science

# Caractérisation des particules dans les lits à galets : expérimentation, développements, méthodologiques et applications in situ

Mathieu Cassel

► **To cite this version:**

Mathieu Cassel. Caractérisation des particules dans les lits à galets : expérimentation, développements, méthodologiques et applications in situ. Géographie. Université de Lyon, 2017. Français. NNT : 2017LYSEN087 . tel-02150081

**HAL Id: tel-02150081**

**<https://theses.hal.science/tel-02150081>**

Submitted on 7 Jun 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Numéro National de Thèse : 2017LYSEN087

## **THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**

opérée par

**l'Ecole Normale Supérieure de Lyon**

**Ecole Doctorale N°483**

**Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie,  
Science Politique, Sociologie, Anthropologie**

**Spécialité de doctorat : Géomorphologie fluviale**

**Discipline : Géographie**

Soutenue publiquement le 01/12/2017, par :

**Mathieu CASSEL**

---

# **Caractérisation des particules dans les lits à galets:**

*expérimentations, développements  
méthodologiques et applications in situ*

---

Devant le jury composé de :

Corbonnois, Jeannine  
Arnaud-Fassetta, Gilles  
Rapporteur

Chapuis, Margot  
Examinatrice

Lavé, Jérôme

Rollet, Anne-julia  
Examinatrice

Malavoi, Jean-René  
Piégay, Hervé

Professeur des Universités Le Mans Université Rapporteure  
Professeur des Universités Université Paris-Diderot

Maître de Conférences Université Nice Sophia Antipolis

Directeur de Recherche CNRS Examineur

Maître de Conférences Université de Caen Basse Normandie

Expert Sénior EDF Co-Encadrant de thèse

Directeur de Recherche CNRS directeur de thèse





ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE LYON  
UNIVERSITÉ DE LYON

LABORATOIRE « ENVIRONNEMENT VILLE  
SOCIÉTÉ »

(CNRS – UMR 5600)

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES SOCIALES (ED 483)



**THÈSE DE DOCTORAT**

Présentée en vue de l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Lyon,  
délivré par l'École Normale Supérieure de Lyon

Discipline : Géographie

**MATHIEU CASSEL**

---

# Caractérisation des particules dans les lits à galets :

*expérimentations, développements méthodologiques  
et applications in situ.*

---

THÈSE SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 01/12/2017 DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

JEANNINE CORBONNOIS	Professeur des Universités, Le Mans Université	(Rapporteur)
GILLES ARNAUD-FASSETTA	Professeur des Universités, Université Paris-Diderot	(Rapporteur)
MARGOT CHAPUIS	Maître de Conférences, Université Nice Sophia Antipolis	(Examinatrice)
JÉRÔME LAVÉ	Directeur de Recherche, CNRS	(Examineur)
JEAN-RENÉ MALAVOI	Expert Sénior, EDF	(Co-encadrant)
HERVÉ PIÉGAY	Directeur de Recherche, CNRS	(Directeur)
ANNE-JULIA ROLLET	Maître de Conférences, Université de Caen Basse Normandie	(Examinatrice)



« (...) Si les rivières puissantes étaient les égales en force du ruisseau temporaire, elles raseraient des chaînes de montagnes, se creuseraient des abîmes de plusieurs milliers de mètres de profondeur, nourriraient des forêts dont les cimes iraient se balancer jusque dans les couches supérieures de l'air. C'est précisément dans ses plus petites retraites que la nature montre le mieux sa grandeur. (...) »

Élisée Reclus, *Histoire d'un ruisseau*, 1869



## REMERCIEMENTS

Voilà voilà.... Ils sont nombreux tous ces humains que je voudrais remercier et je ne sais pas vraiment par où, par qui en fait, ni comment commencer.

Je débiterai par du non-Être : ce sera plus facile pour commencer. C'est l'immortelle, l'inconsciente et l'immatérielle. Celle qu'on souhaite, pour les autres et pour soi; qu'on ne peut trouver quand on la cherche car c'est seulement elle qui nous trouve, à condition de lui en laisser l'opportunité. Oui, car je suis d'abord reconnaissant auprès de la Vie et de la chance qui m'est donnée chaque jour, au présent, au cours des années de ce travail de thèse et depuis ces jours dont je n'ai pas de souvenir. Merci à la Vie pour tout ce qu'elle offre en cadeau, pour promouvoir une passion ou cultiver une curiosité, pour tout ce qu'elle apporte comme enseignement aux petits, aux moyens, aux grands et merci pour l'amour : celui qui n'a besoin ni d'adjectif ni de cible. Cette thèse (dans ce laboratoire : EVS, avec ces collègues-ci, ces encadrants-là, ces collaborateurs ici et là-bas et la liberté) illustre parfaitement la chance telle que ressentie ci-dessus. Je sais toutefois que la chance n'est pas « responsable » des actions des humains et je ne peux pas résister au besoin de dénoncer quelques-uns des humains dont les actions sont très directement liées à mon sentiment de gratitude et à la chance qui m'est donnée.

Mes premiers mots de gratitude vont à Hervé Piégay et à Jean-René Malavoi (*Jah Jah Bless you*). J'ai le sentiment que vous m'avez fait confiance de bout en bout de ce projet et que vous m'avez offert une liberté inespérée, un soutien indéfectible et des enrichissements innombrables et inquantifiable. Je n'ai pas de mots suffisamment forts pour vous remercier à la hauteur de ma reconnaissance et vous suis sans doute à jamais dévoué.

Pour continuer avec ces scientifiques qui m'inspirent, je veux ensuite remercier Jérôme Lavé pour son accueil et sa disponibilité lors de mes passages à Nancy, mais aussi pour le sérieux de ses critiques, toujours empreintes de bienveillance, de curiosité ou de la volonté de mieux faire, de toujours pousser plus loin la réflexion, et l'entrain dans les échanges pendant la rédaction des articles sur nos études. Un apport (scientifique et humain) unique.

Je tiens à remercier formellement et tout aussi grandement, Jeannine Corbonnois et Gilles Arnaud-Fasseta d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse et d'en assumer le travail d'évaluation. De même, je remercie chaleureusement les membres du jury que je n'ai pas encore mentionné : Margot Chapuis et Anne-Julia Rollet, dont les travaux ont souvent servi de références à mon travail et dont j'espère être digne.



Même si notre collaboration remonte à quelques années (2009), je souhaite remercier Frédéric Liébault. Il m'a révélé un environnement « naturel » autant qu'une passion intérieure : les rivières graveleuses et la recherche en géomorphologie fluviale. Les quelques mois qu'avaient duré ce stage furent une entrée « de bonheur professionnel » et cette thèse est le fruit de l'appétit qu'elle avait créé.

Il me faut également dénoncer Fanny Arnaud (Mme. PIT tag), Thomas Depret (Ya Du!, mein deutschsprachiger Freund, bald würde ich dich haben) et Jérémie Riquier (le nounours prêt à pouponner parfois déguisé en ours mal léchés). Ceux-ci ont systématiquement fait preuve de disponibilité, d'écoute, d'intérêt à chacune de mes interruptions qui souvent commençaient par « T'as deux secondes, je me pose une question et je voudrais avoir ton sentiment ». Ces échanges ont énormément compté dans mes réflexions et je vous en remercie beaucoup.

Dans un autre registre, je tiens à citer Anne Clemens et la Zone Atelier Bassin du Rhône. Merci à la ZABR pour plusieurs financements qui nous ont permis d'acquérir et développer du matériel ainsi que d'équiper certains sites. Et un merci spécial à Anne Clemens. Sans toi, Anne, je n'en serai pas là... tout à rebondit un 18/02/2014. Compte sur moi pour IS.River 2018... je n'ai pas encore proposé de résumé mais je piocherai dans la partie perspective dès le manuscrit déposé et je serai là. Sûr !

Un gRand meRci à Lise VaudoR, la gRande pRêtesse de R et des statistiques. Mes fRéquentes inteRrptions dans son repèRe de buReau sont toujouRs ( $R^2=1$ ) couRonnées d'infoRmations et Renseignements de gRand intÉRêt.

Je remercie également Jessica Ludy qui m'a accueilli et fait découvrir San Francisco à l'occasion de ma première conférence internationale à l'AGU. Nous nous sommes rencontrés en 2009 lorsque je travaillais avec Fred à l'Institut de Beaumont de Matt Kondolf. En 2010, elle était passée dans la plaine du Rhin et nous avons visité quelques aménagements du fleuve. Et en 2016, je me retrouve invité à la dernière minute à un dîner « professionnel », 4 semaines avant de décoller pour SF. Une autre illustration de la chance que je mentionnai plus tôt. Huge Thank to you Jessica. With much appreciation and gratitude for your indescribable generosity.

Je témoigne aussi ma gratitude à Kristell Michel, Ludovic Bultingaire, Brice Noirot. Vous avez assumé avec brio des activités que nous avons partagé ou que je vous ai déléguées : travail de terrain, confection de galets synthétiques, analyse d'images, réalisation d'expérimentation. Je sais votre sérieux mais aussi votre bonne humeur.

Je voudrais encore mentionner et remercier Anne Honegger, Monique Noharet, Séverine Morin et Patrick Gilbert qui m'ont indéfectiblement aidé pour boucler des budgets de voyage, d'expéditions de terrain ou pour gérer divers aspects administratifs.

Pour presque finir, je tiens à remercier tou-te-s les membres présent-e-s, passé-e-s, permanent-e-s du laboratoire EVS. Il est difficile d'exprimer précisément comment ils et elles opèrent ensemble, mais ils/elles parviennent à développer une ambiance de partage incroyable et une atmosphère de travail formidable. J'ai connu deux ambiances qui rivalisent avec celle-ci : elles impliquaient F.L et J.R.M.

Je remercie dans le désordre, pour des échanges des plus divers qu'il serait trop long de détailler : Peter Downs, Pascale Biron, Mikaël Attal, Oldrich Navratil, Jérôme Lejot, Franck Lavigne, Rémi Loire, Marylise Cottet, Robin Jenkinson, Guillaume Fantino, Nicolas Chatard, Rémi Kassubeck et Franck Perret.

Enfin, pour finir pour de vrai, et parce que je me suis gardé le meilleur pour la fin : je tiens à témoigner une grande et toute particulière gratitude à ma famille. Ils ne sont pas si nombreux ces petits, ces moyens et ces grands, ces nouveaux, ces anciens et ces disparus mais chacun d'eux est unique et constitue un modèle à sa manière. Depuis des années, ils m'ont inspiré la patience et la tempérance, l'endurance et la résistance, l'autogestion et la conviction, l'imagination et la création, l'énergie et la synergie, et l'amour, surtout l'amour... Je n'en dénoncerai nommément que 4. Diego, merci d'avoir attendu que je rentre de Suisse car j'aurais nourri bien des regrets de ne pas avoir été présent à ton arrivée. Ines, merci pour tes sourires, tes rires, tes « chants » et tes questions qui m'extraient des rêvasseries professionnelles qui débordent parfois à la maison. Mamie Domi, puisque c'est comme ça qu'on t'appelle maintenant, merci en particulier pour le temps consacré à la relecture de ce travail. Marta : la *Perlita*, toi à qui j'ai confié ma liberté sur laquelle tu as veillé pendant tout ce travail, et sur laquelle tu continues de veiller : MERCI pour TOUT. Ce grand TOUT que je veux garder pour nous car je n'en vois pas les bous et qu'il s'étend chaque jour tel un univers fou.

Ah ! Et un ultime merci à tous ceux qui, le week-end, me tendent des cailloux en pensant me faire un super cadeau. Je râle en disant que je ne travaille pas le week-end mais je ne peux pas m'empêcher de les observer avec curiosité, alors restez vous-mêmes.

Cette thèse parle de cailloux mais, sans tous ces humains, elle ne serait rien.



## RÉSUMÉ

---

Les mosaïques de paysages dessinées par les cours d'eau sont le fruit de fonctionnements complexes. Ces fonctionnements sont appréhendés à divers échelles spatio-temporelles (*e.g.*, bassin versant, secteurs fonctionnels, macroformes alluviales ou particules sédimentaires) décrites au sein du concept de système fluvial. Le fonctionnement des systèmes fluviaux s'établissent autour d'équilibres sédimentaires mettant en balance les flux liquides et solides. C'est pourquoi, l'état géomorphologique des cours d'eau à charge sédimentaire graveleuse peut être décrit au travers d'un prisme sédimentaire par l'observation de tendances générales à large échelles, de phénomènes plus ou moins localisés tels que l'incision, l'engravement, la migration des formes sédimentaires ou des modifications des propriétés géométriques des particules constituant la charge sédimentaire. Ainsi, la meilleure connaissance du rôle des flux sédimentaires actuels et passés dans l'état géomorphologique pour la prédiction des trajectoires hydrosédimentaires des cours, répond à des objectifs à la fois écologiques (la perméabilité de la nappe d'alluvions et de la zone hyporhéique exercent des fonctions auto-épuratrices (Datry *et al.*, 2008), la faune benthique est la base de la chaîne alimentaire des écosystèmes fluviaux), politiques (liés à la gestion des risques d'inondation et d'érosion des terres ou d'ouvrages d'ingénierie) ou encore philosophiques (quel fonctionnement de référence pour quel système fluvial ? Quelle implication et quel rôle pour l'Homme dans le fonctionnement de ces systèmes anthropisés à divers degrés ?).

Aussi, le développement d'outils et de méthodologie(s) pour la caractérisation des flux sédimentaires ou des processus observés en rivières constitue un axe de recherche important en constante émulsion. Les recherches que nous avons engagés sont articulées autour de trois axes interdépendants : (1) les propriétés physiques des particules sédimentaires, (2) leur mobilité et (3) leur transformation par abrasion.

Dans le cadre de ce typique, nous avons cherché à lever le doute subsistant concernant le rôle de la fracturation de traceurs naturels (calcaires) équipés de transpondeurs passifs basses fréquences (PIT-tag) dans les faibles taux de retours observés sur le terrain ; et à tester l'intérêt de l'utilisation de galets synthétiques pour la conception de nouveaux traceurs équipés de transpondeurs actifs ultra hautes fréquences (a-UHF). Nous avons ensuite testé le potentiel de ces transpondeurs (a-UHF), dont les caractéristiques d'émission sont mieux adaptées que celles des PIT-tag à l'étude du fonctionnement des macroformes fluviale à l'échelle de tronçons fonctionnels, puis avons développé une méthodologie de recherche en rivière spécifique à ces nouveaux traceurs. Par ailleurs, Nous avons testé la sensibilité à divers

paramètres d'entrée d'un programme de calcul d'émoussé de particules sédimentaires grossières, en avons validé son intérêt pour l'analyse (1) des relations entre évolution des indices d'émoussé et abrasion de la masse sédimentaire et (2) du fonctionnement hydrosédimentaire d'un bassin versant et avons formulé les recommandations nécessaires de respecter pour sa bonne utilisation. Enfin, nous avons cherché à comparer les influences respectives de la densité et de la forme des particules sédimentaires pendant leur transport par charriage. Ces résultats soulignent l'influence au moins aussi grande de la forme comparée à la mobilité, sur le déplacement des particules sédimentaires.

### MOTS-CLÉS :

Rivière à charge graveleuse, transport solide, charriage, charge de fond, fonctionnement hydrosédimentaire, macroforme alluviale, traçage sédimentaire, RFID, PIT tag, transpondeurs actifs, influence de la forme, mesure de l'émoussé, abrasion, mobilité de la particule

## ABSTRACT

The influence of fluvial systems dynamics on riverine landscape patterns is the consequence of complex ecosystem dynamics. These driving factors can be analysed at different spatiotemporal scales of the fluvial system (for example: river basin, functional units, alluvial megaforms or sedimentary particles). The dynamic of fluvial systems depends on the equilibrium between solid and liquid fluids. For this reason, the geomorphological status of watercourses can be described from a sedimentary perspective taking into account general trends at large scale, local characteristics such as incision, aggradation, sedimentary migration or the alteration of particles' geometrical properties that constitute bed load. Thus, a better understanding of the influence of past and present sedimentary flows on the geomorphological status of watercourses has at the same time an ecological impact (permeability of both the alluvial layer and the hyporheic zone and its self-filtration function (Datry et al., 2008)), a political impact (related to flood management, erosion risks and issues or hydraulic facilities) or even a philosophical issue (what is the appropriate reference for what fluvial system? What is the role of Humanity on these anthropized environments and at what extent?).

Thus, the development of methodological tools to characterize sedimentary flows or the observed dynamics on rivers, is considered a major and rising research issue. The research studies described in this thesis are structured in three distinct topics: (1) physical properties of sedimentary particles; (2) their mobility; (3) their transformation as a consequence of abrasion.

In this context, we have analysed the relationship between breakage and low recovery rates for natural tracers (limestone pebbles) equipped with low frequency passive transponders (PIT-tag). In addition, we have tested the use of synthetic pebbles to create new tracers equipped with high frequency active transponders (a-UHF), more performant than PIT-tags. Secondly, we have developed a new search and location field methodology specially, adapted to these new transponders. Thirdly, we have tested the sensibility of the toolbox developed by Roussillon et al. (2009), design to measure the roundness of coarse sedimentary particles, to different entry parameters. We have confirmed its interest to (1) analyse the relationship between particles normalized abrasion and its roundness trends; (2) analyse the hydrosedimentary dynamics at a river basin scale. We have included several recommendations to apply this toolbox in the appropriate conditions. Finally, we have performed a comparative analysis between particles' density and shape and its influence on bedrock transport. These results highlight the significant influence of shape on travelled distance in comparison with density.



# SOMMAIRE

---

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>- 7 -</b>
<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>- 11 -</b>
<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>- 15 -</b>
<b>CHAPITRE 1 : CONTEXTE SCIENTIFIQUE.....</b>	<b>- 17 -</b>
1.1 LE SYSTÈME FLUVIAL .....	- 19 -
1.2 LES CARACTÉRISTIQUES D'UNE PARTICULE SÉDIMENTAIRE.....	- 34 -
1.3 LE TRANSPORT SOLIDE ET MOBILITÉ DES PARTICULES .....	- 67 -
1.4 PROBLÉMATIQUES DE RECHERCHE .....	- 102 -
<b>CHAPITRE 2 : EFFET DU TRANSPORT ET DE L'INSERTION DE TRANSPONDEURS D'IDENTIFICATION PAR RADIO FRÉQUENCE SUR LA RÉSISTANCE ET LA FORME DE GALETS NATURELS ET SYNTHÉTIQUES : APPLICATION POUR TRAÇAGE SÉDIMENTAIRE DE CHARGE GROSSIÈRE EN MILIEU FLUVIAUX ET COSTAUX. ....</b>	<b>- 105 -</b>
2.1 INTRODUCTION .....	- 106 -
2.2 MATERIALS AND METHODS .....	- 108 -
2.3 RESULTS.....	- 117 -
2.4 DISCUSSION.....	- 129 -
2.5 CONCLUSION .....	- 134 -
<b>CHAPITRE 3 : ÉVALUATION D'UNE NOUVELLE SOLUTION POUR LE TRAÇAGE DE GALETS EN MILIEU FLUVIAL BASÉE SUR DE LA RADIO IDENTIFICATION ACTIVE.....</b>	<b>- 137 -</b>
3.1 INTRODUCTION .....	- 138 -
3.2 MATERIALS AND METHODS.....	- 141 -
3.3 RESULTS.....	- 150 -
3.4 DISCUSSION AND RECOMMENDATIONS.....	- 162 -
<b>CHAPITRE 4 : TESTS PRATIQUES ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE POUR LA MESURE DE L'ÉMOUSSÉ DE PARTICULES SÉDIMENTAIRES FLUVIAL GROSSIÈRES PAR TRAITEMENT INFORMATIQUE D'IMAGE EN DEUX DIMENSIONS.....</b>	<b>- 167 -</b>
4.1 INTRODUCTION .....	- 167 -
4.2 MATERIALS AND METHODS.....	- 172 -
4.3 RESULTS.....	- 182 -
4.4 DISCUSSION.....	- 194 -
4.5 CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS .....	- 198 -
<b>CHAPITRE 5 : ETUDE COMPARATIVE DE L'EFFET DE LA FORME ET DE LA DENSITÉ SUR LA MOBILITÉ DE PARTICULES GROSSIÈRES. ....</b>	<b>- 201 -</b>
5.1 INTRODUCTION .....	- 201 -
5.2 METHODS .....	- 202 -
5.3 RESULTS.....	- 204 -
5.4 DISCUSSION.....	- 207 -
<b>SYNTHÈSE .....</b>	<b>- 209 -</b>
LA CONCEPTION DE GALETS SYNTHÉTIQUES. ....	- 209 -
LES TRANSPONDEURS ACTIFS ULTRA HAUTES FRÉQUENCES POUR LE SUIVI DE LA MOBILITÉ DES GALETS ...	- 210 -
PERTINENCE DE LA TOOLBOX DE ROUSSILLON <i>ET AL.</i> (2009) POUR L'ÉTUDE DE L'ÉMOUSSÉ.....	- 211 -
SYSTÈME RFID ET CANAUX EXPÉRIMENTAUX. ....	- 212 -
<b>PERSPECTIVES ET DÉVELOPPEMENTS FUTURS.....</b>	<b>- 215 -</b>
LA CONCEPTION DE GALETS SYNTHÉTIQUES. ....	- 215 -
LES TRANSPONDEURS ACTIFS ULTRA HAUTES FRÉQUENCES POUR LE SUIVI DE LA MOBILITÉ DES GALETS ...	- 215 -
SYSTÈME RFID ET CANAUX EXPÉRIMENTAUX. ....	- 220 -
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>- 221 -</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>- 253 -</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>- 257 -</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>- 258 -</b>





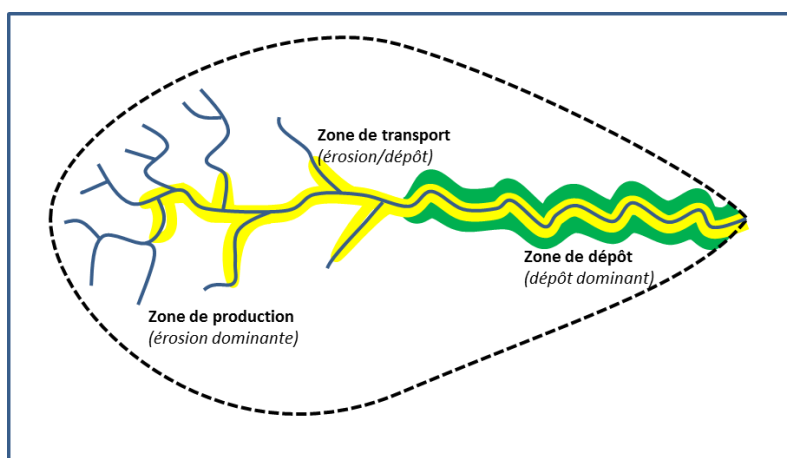
## CHAPITRE 1 : CONTEXTE SCIENTIFIQUE

La diversité remarquable des paysages formés par les cours d'eau est le fruit d'équilibres dynamiques entre de nombreux processus bio-géophysiques dont les intensités des interactions sont très variables dans l'espace et le temps. L'hydromorphologie fluviale est l'étude des processus physiques régissant le fonctionnement des cours d'eau et des formes qui en résultent. Elle constitue un champ de recherche à l'interface de nombreuses disciplines scientifiques (géomorphologie fluviale, écologie, physiques des particules et des fluides, climatologie et hydrologie, géologie, ou encore sociologie) faisant appel à de nombreux concepts pour les articuler (Malavoi et Bravard, 2010). Parmi ces concepts, il en est deux fondamentaux: le système fluvial et l'hydrosystème.

**Le système fluvial** (Schumm, 2003) est un concept purement géomorphologique qui décrit l'organisation spatiale des transferts d'eau et de sédiments. Il distingue trois zones du bassin versant, au sein desquelles les processus d'érosion, de transport et de dépôt coexistent à différentes intensités. La *zone de production* (érosion > accumulation), située tout à l'amont des bassins versants, est constituée par les versants et les têtes de bassin (**Figure 1**). L'érosion, engendrée par des processus gravitaires et de versants, produit des sédiments rapidement exportés vers l'aval par des systèmes torrentiels. En position intermédiaire, on trouve la *zone de transfert* (érosion = accumulation). Les processus d'érosion et de dépôt s'équilibrent au sein de corridors fluviaux ou de plaines alluviales plus ou moins dynamiques selon le degré d'atténuation de l'influence des versants. C'est le domaine de prédilection des mosaïques fluviales (Liébault, 2003). Enfin, le plus aval, se situe la *zone de stockage* (érosion < accumulation). Dans ces zones, le dépôt l'emporte sur l'érosion et favorise le développement de larges formes d'accumulation (plaine d'inondation ou delta). Ce concept de système fluvial se concentre sur la dimension longitudinale des cours d'eau, structurée par des flux (hydrologiques et sédimentaires) unidirectionnels : de l'amont vers l'aval. Sa zonation fonctionnelle peut se concevoir à différentes échelles du bassin versant (Liébault, 2003; Piégay, 2016). Par exemple :

- À l'échelle d'un torrent, le bassin peut être découpé en un bassin de réception (*zone de production*), un chenal d'écoulement (*zone de transfert*) et un cône de déjection (*zone d'accumulation*).

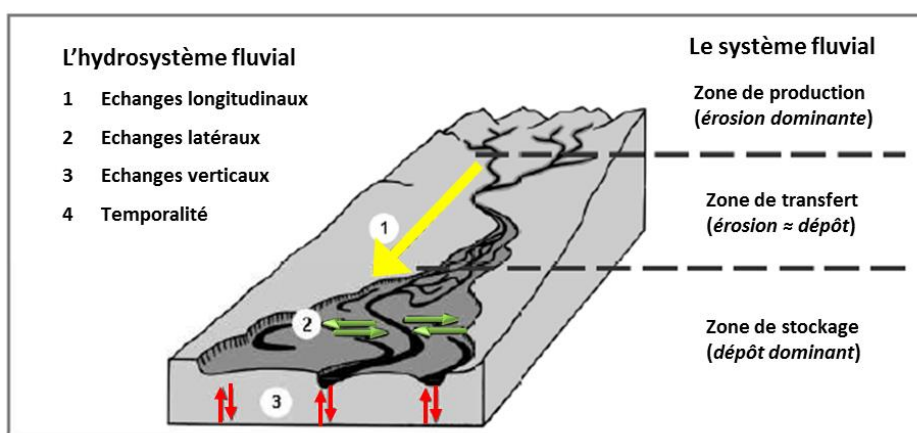
- À celle du fleuve, le bassin est constitué par l'ensemble des têtes de bassin (*zone de production*), par une plaine alluviale ou un corridor fluvial (*zone de transfert*) et par un delta ou une embouchure (*zone de stockage*).



**Figure 1. Schématisation du concept de système fluvial de (Schumm, 2003) modifié d'après (Church, 2002) dans (Chapuis, 2012).**

Notes : zone de production en blanc, zone de transfert en jaune, zone de dépôt en vert.

L'hydrosystème fluvial (Roux, 1982; Amoros et Petts, 1993) est un sous-ensemble du système alluvial dans lequel les échanges, non seulement de matériaux, mais aussi d'énergie, de nutriments, et d'Êtres vivants sont appréhendés dans les trois dimensions spatiales: longitudinale (de l'amont vers l'aval), latérale (entre le lit mineur et la plaine alluviale), mais aussi verticale (entre le chenal et sa nappe d'accompagnement); et la dimension temporelle (**Figure 2**). Ce concept insiste sur la hiérarchisation spatiale et fonctionnelle d'unités emboîtées au sein du système fluvial et dans lesquelles des flux bidirectionnels peuvent être considérés au plus près des variations des processus (Thorp *et al.*, 2008). Il est typiquement adapté à l'étude interdisciplinaire des plaines alluviales.



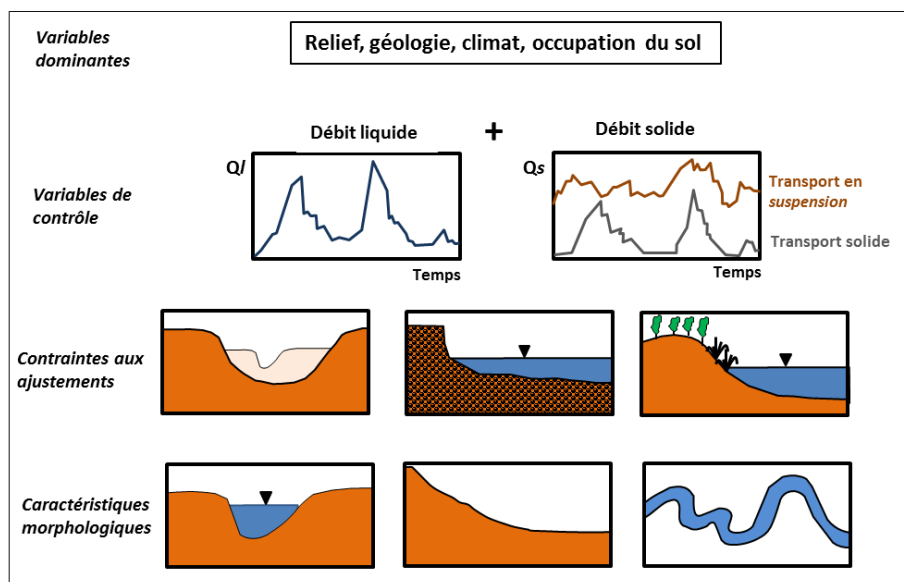
**Figure 2. Schématisation de l'Hydrosystème fluvial (d'après Amoros et Petts, 1993).**

Le système fluvial propose donc une formalisation des interrelations entre le bassin versant et son cours d'eau, ainsi qu'entre les différents tronçons (unités homogènes d'un point de vue morphologique et fonctionnel) d'un cours d'eau. L'hydrosystème, quant à lui, se concentre sur les échanges entre le cours d'eau et sa plaine alluviale (Rollet, 2007) et constitue une unité spatiale du réseau hydrographique, classiquement adopté avec l'objectif de déterminer des propositions de gestion (Touchart, 2005).

## 1.1 LE SYSTÈME FLUVIAL

### 1.1.1 Structure conceptuelle

Le système fluvial est composé de plusieurs variables hiérarchisées qui sont en interactions (Schumm, 2003 ; Figure 3).



**Figure 3. Hiérarchisation des variables du système fluvial (modifié d'après Thorne, 1997).**

Des *variables dominantes* : le relief, la géologie, le climat et l'occupation des sols, contraignent les *variables de contrôle* que sont le débit liquide ( $Q_l$ ) et le débit solide ( $Q_s$ ). Les *variables dominantes* sont relativement stables dans le temps, tandis que les variables de *contrôle* présentent des fluctuations inter- et intra-annuelles pouvant être à la fois rapides, de grandes amplitudes, saisonnières ou exceptionnelles. Les *variables de contrôle* conditionnent les *caractéristiques morphologiques* (largeur, profondeur, pente et sinuosité lit mineur, longueur d'onde des méandres), qui constituent les variables de réponse du système fluvial. La nature de ces dépendances a été formalisée par Knighton (1998) qui a proposé des relations empiriques permettant de prédire les ajustements des caractéristiques morphologiques après une ou plusieurs modifications des variables de contrôles.

Selon Knighton:

$$Q_l^+ \quad Q_s^- \quad \Rightarrow \quad w^+ d^+ w/d^+ \lambda^+ s^- \quad (1)$$

$$Q_l^- \quad Q_s^- \quad \Rightarrow \quad w^- d^- w/d^- \lambda^- s^+ \quad (2)$$

$$Q_l^- \quad Q_s^+ \quad \Rightarrow \quad w^+ d^- w/d^+ \lambda^+ S^- s^+ \quad (3)$$

$$Q_l^- \quad Q_s^- \quad \Rightarrow \quad w^- d^+ w/d^- \lambda^- S^+ s^- \quad (4)$$

$$Q_l^+ \quad Q_s^+ \quad \Rightarrow \quad w^+ d^{+/-} w/d^+ \lambda^+ S^- s^{+/-} \quad (5)$$

$$Q_l^- \quad Q_s^- \quad \Rightarrow \quad w^- d^{+/-} w/d^- \lambda^- S^+ s^- \quad (6)$$

$$Q_l^+ \quad Q_s^- \quad \Rightarrow \quad w^{+/-} d^+ w/d^{+/-} \lambda^{+/-} S^+ s^- \quad (7)$$

$$Q_l^- \quad Q_s^+ \quad \Rightarrow \quad w^{+/-} d^- w/d^{+/-} \lambda^{+/-} S^- s^+ \quad (8)$$

Dans lesquelles +, – et = indiquent respectivement une augmentation, une réduction ou une stabilité du contrôle ( $Q_l$  ou  $Q_s$ ) ou de la caractéristique morphologique ( $w$  : la largeur du lit,  $d$  : la profondeur du chenal,  $w/d$  : le ratio largeur sur profondeur,  $\lambda$  : la longueur d'onde des méandres,  $S$  : la sinuosité du chenal et  $s$  : la pente du lit).

Toutefois, malgré l'aspect indispensable de ces relations pour la compréhension ou la prédiction des ajustements fluviaux, elles ne sont pas suffisantes. En effet, les ajustements des caractéristiques morphologiques à des modifications des variables de contrôle peuvent toutefois être atténuées ou amplifiées par *des contraintes aux ajustements* (Petts, 1979; Thorne, 1997 : pente de la vallée, de la granulométrie des berges et du lit et de la végétation riveraine). Par exemple, la structuration des couches d'alluvions (Depret, 2014) et le pourcentage d'argile (Schumm, 1960) présent dans la matrice des berges contrôlent leur cohésivité, autrement dit, leur sensibilité à l'érosion et donc la mobilité latérale, la largeur du lit mineur, voire le style fluvial du cours d'eau (Mackin, 1956). De même, le développement de la végétation sur les berges tend à fixer les matériaux avec leurs racines réduisant ainsi l'érosion des berges, et *in fine* contribue à limiter la mobilité latérale et à réduire la largeur du lit mineur (Thorne, 1997).

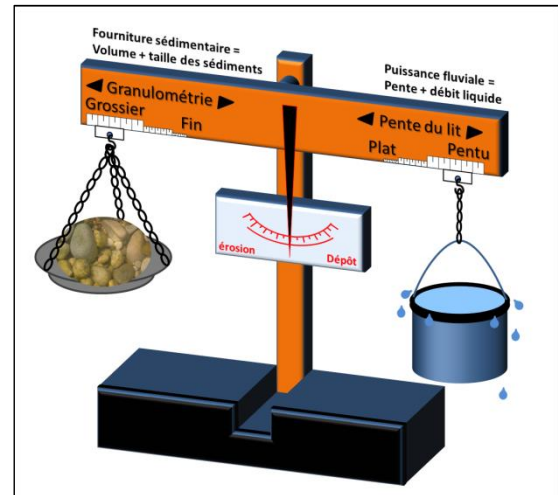
De plus, il existe des effets de rétroactions agissant sur les contraintes d'ajustement (Liébault et Piégay, 2002; Dufour, 2005). Ainsi, une diminution du volume de sédiment en transit ( $Q_s^-$ ) conjuguée à une stabilité de la capacité de transport du cours d'eau ( $Q_l^-$ ), provoquent une incision progressive du cours d'eau dans son lit ( $d^+$ ). Celle-ci induit une diminution de la fréquence de submersion des bancs qui sont alors plus facilement colonisés par la végétation pionnière ( $w^-$ ). Le développement de cette végétation stabilise alors les berges des bancs qui sont de moins en moins sensibles à l'érosion. Les sédiments constituant

les bancs ne sont plus mobilisables par le cours d'eau, ce qui contribue au déficit sédimentaire ( $Q_s^-$ ) : l'incision et la rétraction du lit mineur s'intensifient encore.

### 1.1.2 Fonctionnement

La dimension temporelle du système fluvial est appréhendée au travers d'un certain nombre de principes.

L'*équilibre dynamique* est défini comme un état moyen autour duquel le système oscille de façon plus ou moins régulière selon les échelles de temps considérées (Sear, 1996). Cet équilibre est classiquement schématisé au niveau des variables de contrôle par la balance de Lane (Lane, 1955) et Borland (Borland, 1960) (Figure 4). Ce schéma relie d'un côté la fourniture sédimentaire (définie par le débit solide  $Q_s$  et la granulométrie  $D$ ), et



**Figure 4. Balance de Lane/Borland**

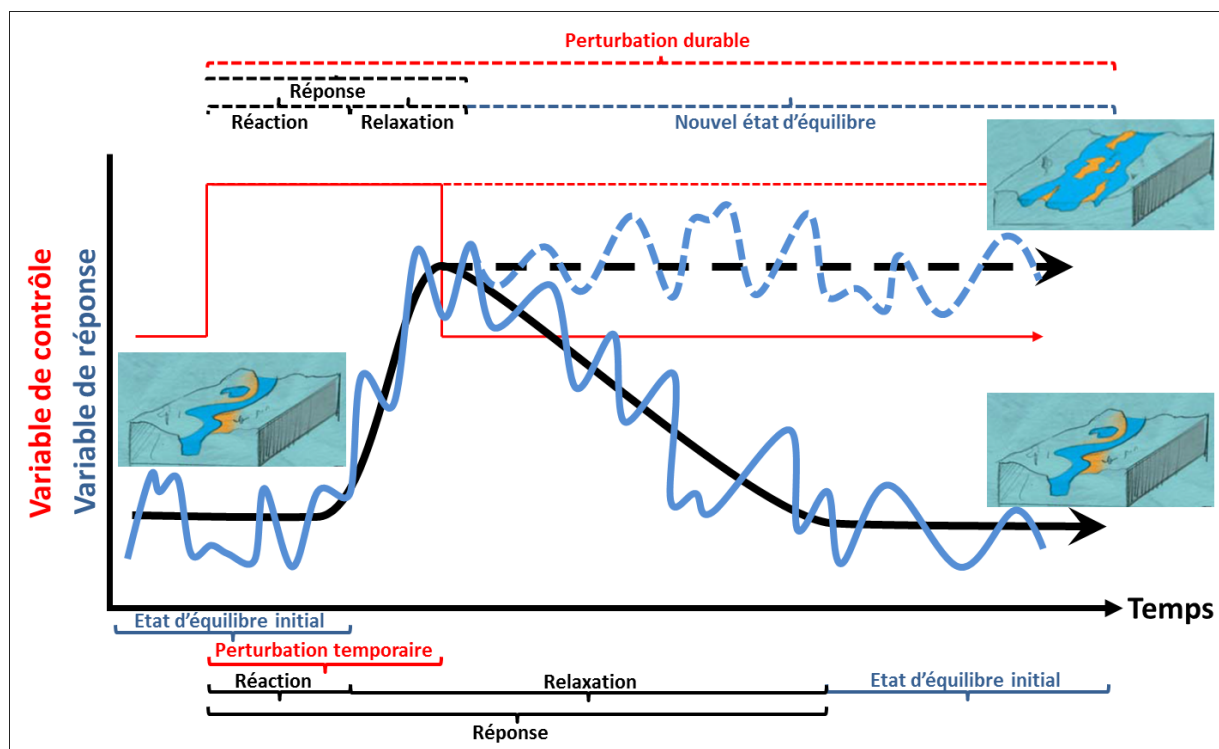
l'énergie disponible pour l'évacuer, ou puissance fluviale (définie par la pente  $I$  et le débit liquide  $Q_l$ ), de l'autre. Cet état d'équilibre dynamique du système peut être représenté par les oscillations constantes de l'aiguille de la balance de Lane/Borland autour du 0, centre de la balance (Figure 4). Toutefois ce concept ancien souffre d'une lacune importante : négligeant les interactions entre le lit du cours d'eau et ses berges, il réduit ce dernier à un chenal sans dynamique latérale.

D'un point de vue morphologique, le système fluvial fluctue autour de l'état moyen en réponse aux crues morphogènes mais sans tendance d'évolution significative et durable de surface (Amoros et Petts, 1993). On peut se représenter ces oscillations comme les phases d'inspiration et d'expiration de la respiration pulmonaire. À l'état d'équilibre, le système fluvial adopte *un régime « permanent »* dans lequel les entrées de sédiments et d'énergies sont égales aux sorties (Liébault, 2003). Les apports par l'amont sont alors transportés vers l'aval sans phénomène critique d'érosion (incision) ou de dépôt (engrèvement). Ce régime permanent se caractérise en outre par une certaine constance :

- des variables de contrôle (*e.g.* magnitude des crues, volume des sédiments en transit) ;
- des contraintes aux ajustements (*e.g.* cycle de colonisation, développement, rajeunissement ou destruction des communautés rivulaires) ;

- de la diversité et de distribution spatiale des formes et des processus fluviaux (e.g. élargissement/rétraction et exhaussement/incision du lit mineur, migration/recoupement de méandre).

Le système fluvial se caractérise également par une capacité de *résilience*, c'est-à-dire de sa capacité à rétablir son état initial après une perturbation. La résilience d'un système dépend de son aptitude à faire jouer des processus de rétroaction négative assurés par les échanges entre les différentes unités de l'hydrosystème fluvial. Le temps mis par le système pour retrouver les conditions d'un équilibre dynamique, appelé *temps de relaxation*, est dépendant des bonnes connexions entre les compartiments du système. Le temps de relaxation intervient après le *temps de réaction* du système (c'est-à-dire la période entre le début de la perturbation et le début de l'ajustement). Ils composent à eux deux le *temps de réponse*.



**Figure 5. Représentation théorique de l'équilibre dynamique du système fluvial et de sa réponse temporaire ou durable à une perturbation brutale provisoire ou durable (adapté d'après Sear, 1996 dans Malavoi *et al.*, 2010 et Knighton, 1998).**

Il existe deux grands types de perturbations identifiés par Brunnsden et Thornes (1979) et également adoptés par Knighton (1998) :

- Les perturbations pulsatives (*pulsed disturbances*) sont des événements de faible fréquence mais de forte intensité, aux effets dans le temps et l'espace généralement limités, et qui autorisent un retour relativement rapide du système aux conditions initiales (e.g. crues exceptionnelle, glissement de terrain rapide) ;

- Les perturbations graduelles (*ramp disturbances*) sont des modifications progressives et durables des variables de contrôles, qui provoquent des changements à longue échéance et impliquent de larges étendues spatiales (e.g. changement de régime des précipitations et/ou des crues) ;

Il conviendrait d'y rajouter les perturbations d'origine anthropique qui peuvent engendrer des modifications durables, de forte intensité et cumulées dont les effets sont à la fois immédiats localement et progressifs à mesure qu'ils se propagent dans le système fluvial (e.g. construction de barrage, chenalisation, travaux du service de Restauration des Terrain en Montagne, extractions de matériaux en lit mineur (Liébault *et al.*, 2005; Piégay *et al.*, 2009)).

L'ampleur des ajustements du système fluvial est définie par une emprise à la fois spatiale et temporelle. Ainsi, Knighton (1998) proposait un graphique conceptuel dans lequel les échelles spatiales et temporelles d'un ajustement du système fluvial sont interdépendantes et considérées en fonction de la discipline qui les étudie (Figure 6). Les ajustements qui ont une grande emprise spatiale (migration puis recouplement de méandres), nécessitent plus de temps pour s'accomplir. Les petits ajustements (la migration d'une dune sur un lit à fond sableux), présentent des emprises spatiales faibles et se réalisent rapidement.

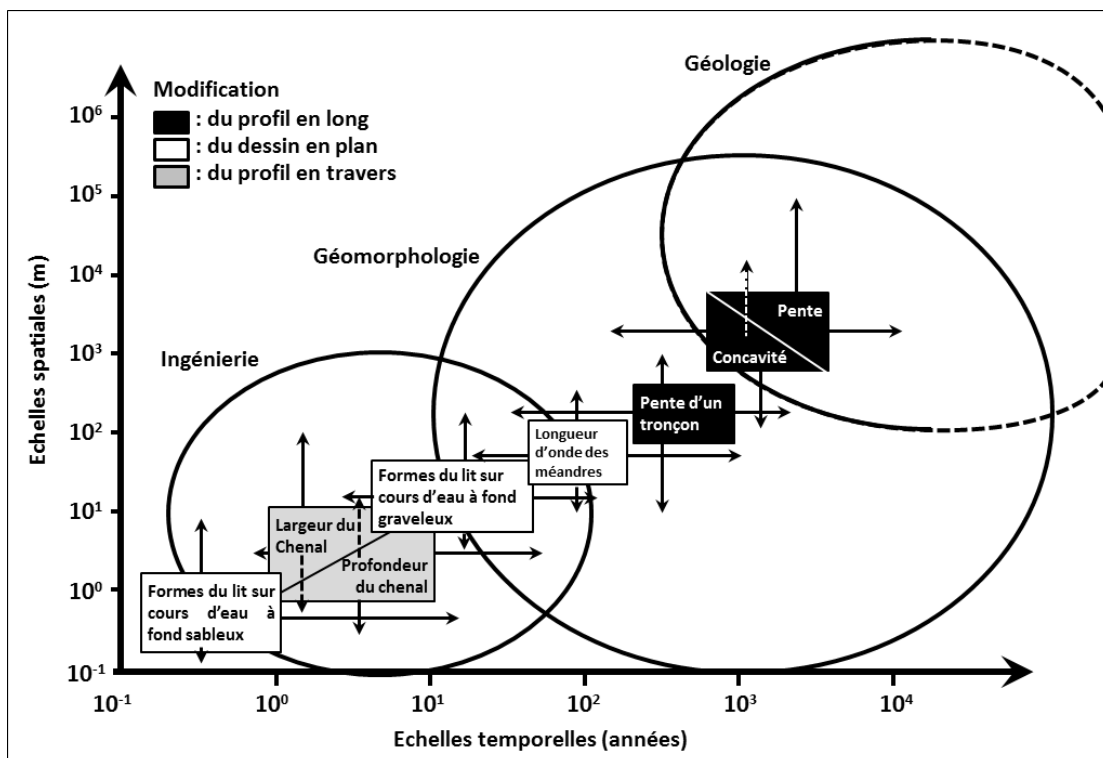
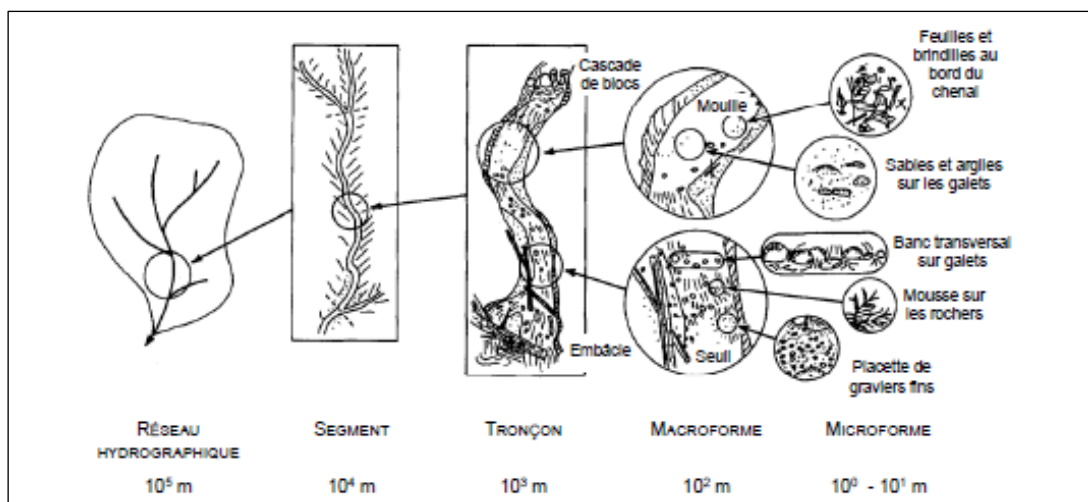


Figure 6. Échelles temporelles des ajustements des différentes composantes géomorphologiques d'un système fluvial (Knighton, 1984).



Devant la complexité et la non-uniformité des systèmes fluviaux ainsi que l'imbrication des échelles spatiotemporelles impliquées dans les processus étudiés par la géomorphologie fluviale, il est apparu judicieux de hiérarchiser et sectoriser des unités aux caractères et aux fonctionnements homogènes. Frissell *et al.*, (1986), dans une optique écologique de caractériser les habitats aquatiques, ont proposé de diviser le système fluvial en cinq niveaux hiérarchiques (Figure 7): Le réseau hydrographique (*stream system*), le segment (*segment system*), le tronçon (*reach system*), la macroforme (e.g. "*pool/riffle/Point bar system*") et la microforme (*microhabitat system*). De même Montgomery et Buffington (1998) ont proposé une classification en cinq niveaux hiérarchiques, plus orientée vers l'étude des problématiques géomorphologiques: la région géomorphologique (*geomorphic region*), le bassin versant (*watershed*), le segment de vallée (*segment valley*), le tronçon (*channel reach*), et la macroforme (*channel unit*). Plus récemment, Chapuis (2012) a proposé des structures géomorphologiques selon une logique d'emboîtement des échelles spatiales tout à fait adaptée à l'analyse des processus régissant le transfert sédimentaire: de tronçons à tronçons (*i.e.* les apports nets positifs entre tronçons excédentaires et tronçons déficitaires (Liébault, 2003)), de formes à formes (*i.e.* érosion de berges vers zones de dépôts), de proche en proche (*i.e.* déplacement individuel des particules) pour caractériser les processus de la mobilité des sédiments grossiers.



**Figure 7. Sectorisation hiérarchisée du système fluvial (adaptée par Chapuis, 2012 d'après Frissell *et al.*, 1986)**

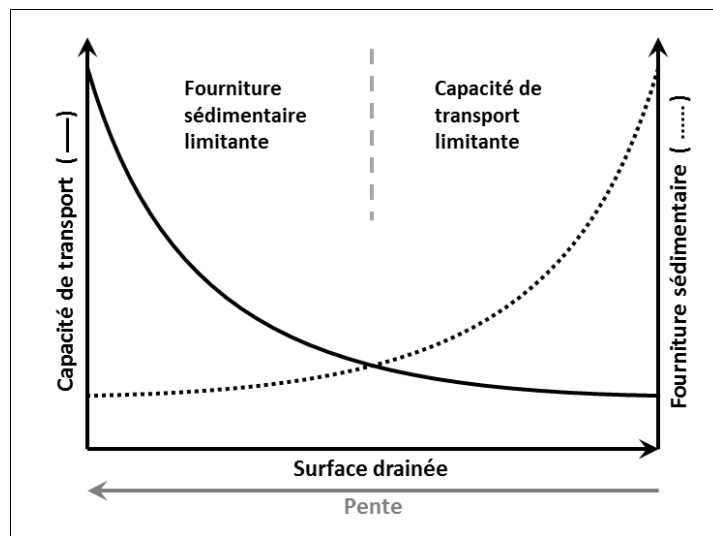
Dans ce cadre conceptuel, on peut caractériser et quantifier des processus à l'échelle locale, puis analyser les dynamiques à l'échelle de secteurs fonctionnels (aux styles géomorphologiques propres) et enfin connecter les différentes dynamiques de ces secteurs pour comprendre le fonctionnement global d'un système fluvial observé à large échelle.

### 1.1.3 Les échelles d'étude du transport solide dans le système fluvial

Les échelles auxquelles le transport solide est le plus étudié sont le bassin versant, le tronçon fonctionnel, la macroforme alluviale et la particule.

#### 1.1.3.1 Le bassin versant

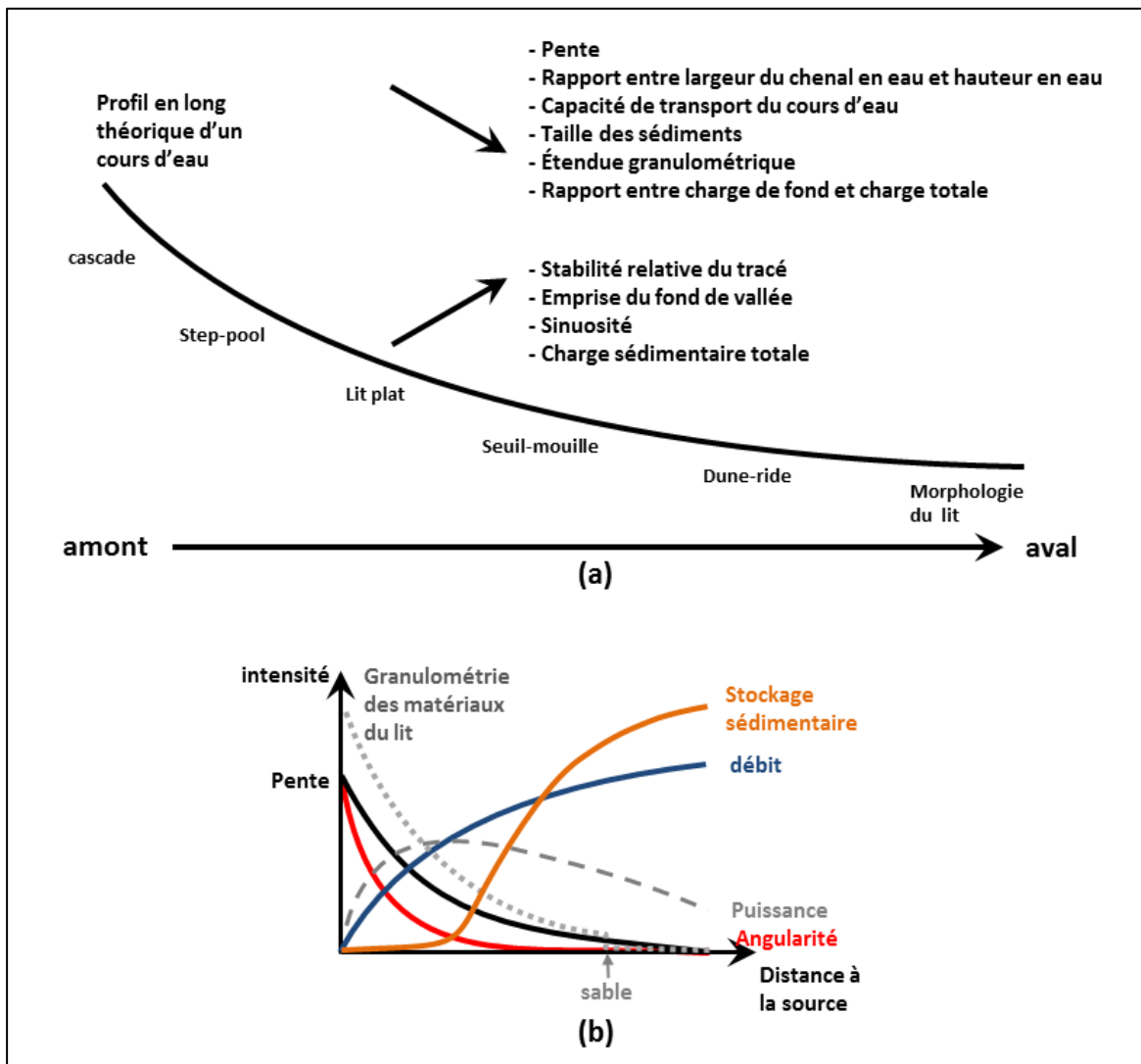
À une large échelle (*e.g.* celle du bassin versant), on observe une évolution longitudinale des caractéristiques physiques des variables de contrôle :  $Q_1$  et  $Q_s$  (Figure 8) ainsi que de la morphologie (Figure 9-a).



**Figure 8. Évolution de la capacité de transport et de la fourniture sédimentaire grossière en fonction du profil en long (Montgomery et Buffington, 1997).**

Ces tendances à large échelles spatiales sont très stables dans le temps. On observe notamment qu'avec la réduction de la pente (Figure 9 ; Montgomery et Buffington, 1997), le système fluvial passe d'une situation où la fourniture sédimentaire est limitante et la capacité de transport très élevée (*zone de production* : érosion > accumulation) à une situation inverse où la capacité de transport devient limitante et la charge sédimentaire excédentaire (*zone de stockage* : érosion < accumulation). En parallèle aux diminutions de l'amont vers l'aval de la pente du lit et de la taille des sédiments, le débit et la largeur augmentent (Figure 9-a). La réduction de la pente réduit la capacité du cours d'eau à transporter les sédiments les plus grossiers tandis que l'augmentation de la superficie du bassin versant va de pair avec une augmentation de la fourniture sédimentaire et des débits (Figure 9-b). L'augmentation des débits compense en partie l'influence de la réduction de la pente sur la puissance fluviale. Si la puissance fluviale reste suffisante pour transporter les particules plus fines jusqu'à l'exutoire, sa diminution provoque une réduction progressive du charriage (volume totale et

frange granulométrique). L'angularité des particules sédimentaires décroît très rapidement dans les premiers kilomètres sous l'effet de l'abrasion avant d'atteindre une forme d'équilibre.



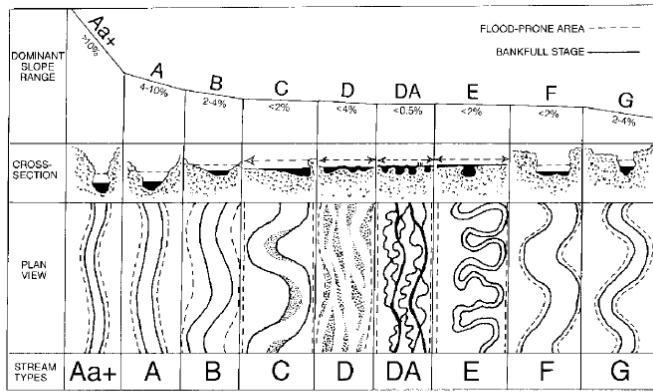
**Figure 9. Évolution des paramètres (a) physiques et de la morphologie du lit du cours d'eau et (b) relatifs au transport sédimentaire en fonction de la distance à la source (adaptée d'après Church, 2002 et Chapuis, 2012).**

Cette vision simplifiée d'une évolution longitudinale progressive et continue du système fluvial, permet de rendre compte de grandes tendances de processus tels que la ségrégation des particules par leur taille ou de leur arrondissement par abrasion mais ne rend pas compte de la diversité des réalités physiques beaucoup plus contrastées observées à des échelles spatiales plus fines. En effet, dans le système fluvial on observe plutôt une succession de tronçons homogènes, de secteurs fonctionnels, au sein desquels la morphologie est relativement uniforme et qui traduit une relative stabilité dans le temps de l'intensité et de l'équilibre entre processus d'érosion, de transport et de dépôt.

### 1.1.3.2 Les secteurs fonctionnels

À l'échelle intermédiaire, les secteurs fonctionnels sont classiquement décrits à l'aide de typologies définissant divers styles fluviaux plus ou moins connectés entre eux. Les premières typologies étaient basées sur le nombre et la forme (*i.e.* la sinuosité) en plan des chenaux (Leopold et Wolman, 1957; Rust, 1978). Sans chercher à replacer ces types de systèmes dans un continuum, Leopold et Wolman distinguaient les lits à chenaux multiples (*braided*) des lits à chenaux uniques (*single-thread*) au sein desquels les chenaux rectilignes (*straight*) et à méandres (*meandering*). Plus tard, les différences de contextes hydrosédimentaires, observées dans les lits à chenaux multiples (*anabranched*), soulignent la nécessaire distinction entre les lits en tresses (*braiding*) et anastomosés (*anastomosed*) (Schumm, 1985; Nanson et Knighton, 1996). Même si cette nomenclature permet une bonne discrimination de grands types de cours d'eau, elle ne reflète pas la diversité des formes et des processus, notamment liés au transport solide, qui s'inscrivent dans un continuum morphologique et dans lequel il existe une multitude de sous-types de styles fluviaux ou de formes de transition (Kleinhans, 2010). Ces deux éléments (continuum et transport solide) sont progressivement intégrés dans les typologies suivantes. Allant dans ce sens, Rosgen (1994) a proposé une classification hiérarchisée intégrant ce concept de continuum, basée sur des caractéristiques géométriques des profils en travers (*e.g.* ratio largeur/hauteur à plein bord), en plan (*e.g.* sinuosité, nombre de chenaux), longitudinal (*e.g.* la pente) et granulométrique (*e.g.* une variable contrainte aux ajustements) (Figure 10). En 1998, Knighton, s'inspirant du travail de Schumm (1981), a proposé une classification discriminant les cours d'eau en fonction de leur charge sédimentaire, de la stabilité relative de leurs formes, de la part de la charge de fond (*e.g.* des sédiments grossiers) dans la masse sédimentaire en transit, de la granulométrie du lit et de la morphologie en plan (Figure 11). Le concept de continuum longitudinal du cours d'eau est marginalisé au profit du volume et de la taille de la charge sédimentaire qui constituent des proxys de la pente qui ne fait plus partie des principaux facteurs discriminants. En 2002, Church a souligné la nécessité de caractériser les styles fluviaux sur ce continuum en se rapprochant des processus qui leur sont propres (Figure 12). En s'inspirant des travaux de Schumm (1963), Church s'est basé sur les variables de contrôle que sont la pente ( $S$ ) et le débit liquide ( $Q_l$ ). Puis en 2006, Church propose de discriminer les styles fluviaux en fonction de la puissance fluviale (intégration de la pente et du débit liquide), du type de sédiment, du mode de transport solide dominant et de la stabilité des formes (Figure 13). Il distingue alors lui aussi quatre types majeurs de cours d'eau:

- Les cours d'eau "labile" (*labile channel*) dans lesquels tous les sédiments du lit sont facilement et fréquemment mobilisés sur tout ou partie de la section.
- Les cours d'eau à "seuils" (*thresholds channel*) où la puissance fluviale ne dépasse que peu la compétence nécessaire au transport des sédiments composant une charge de fond grossière. Les changements de morphologie y sont par conséquent lents.
- Les cours d'eau de "transition" (*transitional channel*) aux caractéristiques intermédiaires par rapport aux deux précédents types : charge sédimentaire abondante avec une étendue granulométrique importante, une forte variabilité spatiale des processus d'érosion et de dépôt et grande diversité des macroformes sédimentaires aux dynamiques également très variables.
- Les cours d'eau "obstrués" (*jammed channel*). Ces cours d'eau, à forte pente, présentent une charge sédimentaire dominée par des blocs agencés en seuils-mouilles (*step -pools*) ou en cascades (*boulder cascades*).



Dominant Bed Material	A	B	C	D	DA	E	F	G
1 RHYOLITE								
2 BOULDER								
3 CORBELLE								
4 GRAVEL								
5 SAND								
6 SILT/CLAY								
ENTRH.	<1.4	1.4-2.2	>2.2	N/A	>2.2	>2.2	<1.4	<1.4
SIN.	<1.2	>1.2	>1.4	<1.1	1.1-1.6	>1.5	>1.4	>1.2
W/D	<12	>12	>12	>40	<40	<12	<12	<12
SLOPE	.04-.099	.02-.039	<.02	<.04	<.005	<.02	<.02	.02-.039

Figure 10. Classification des styles fluviaux de Rosgen (1994). Profils en travers et dessin en plan des chenaux des principaux styles (en haut) et caractéristiques physiques des sous-types (en bas).

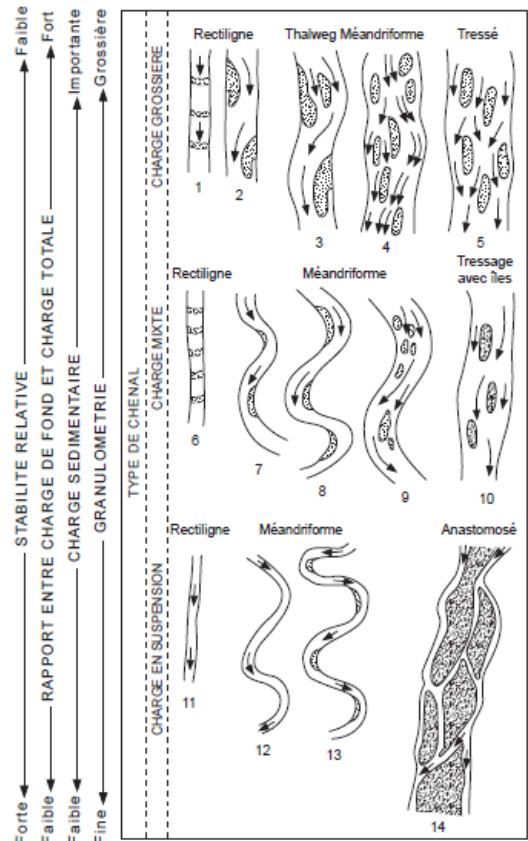


Figure 11. Classification des styles fluviaux d'après Schumm (1981) dans Knighton (1998) et Chapuis, 2012.

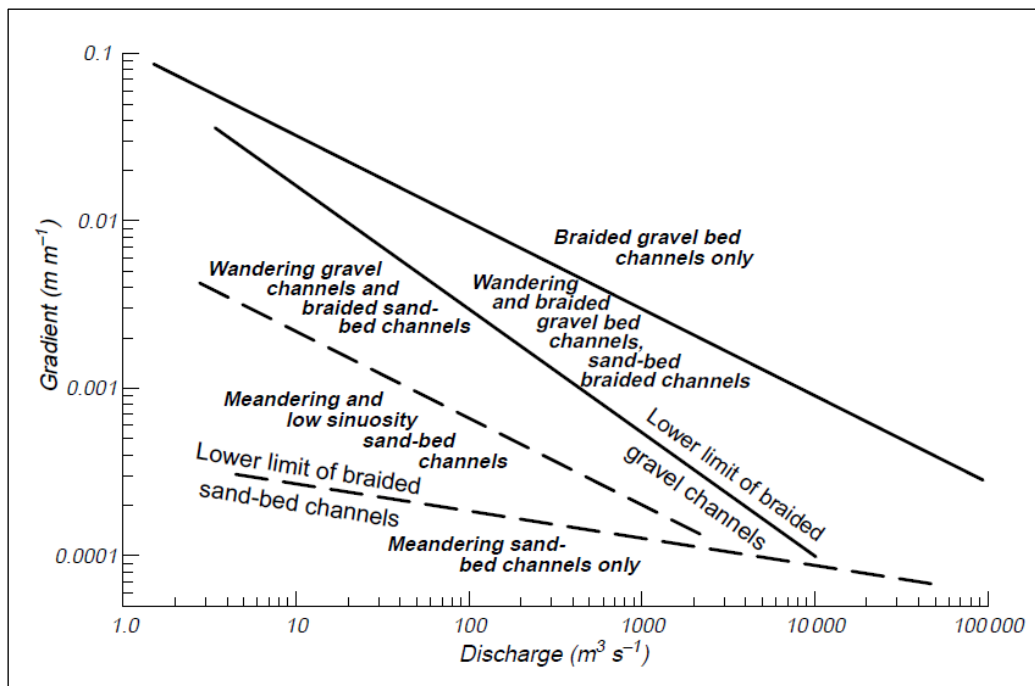
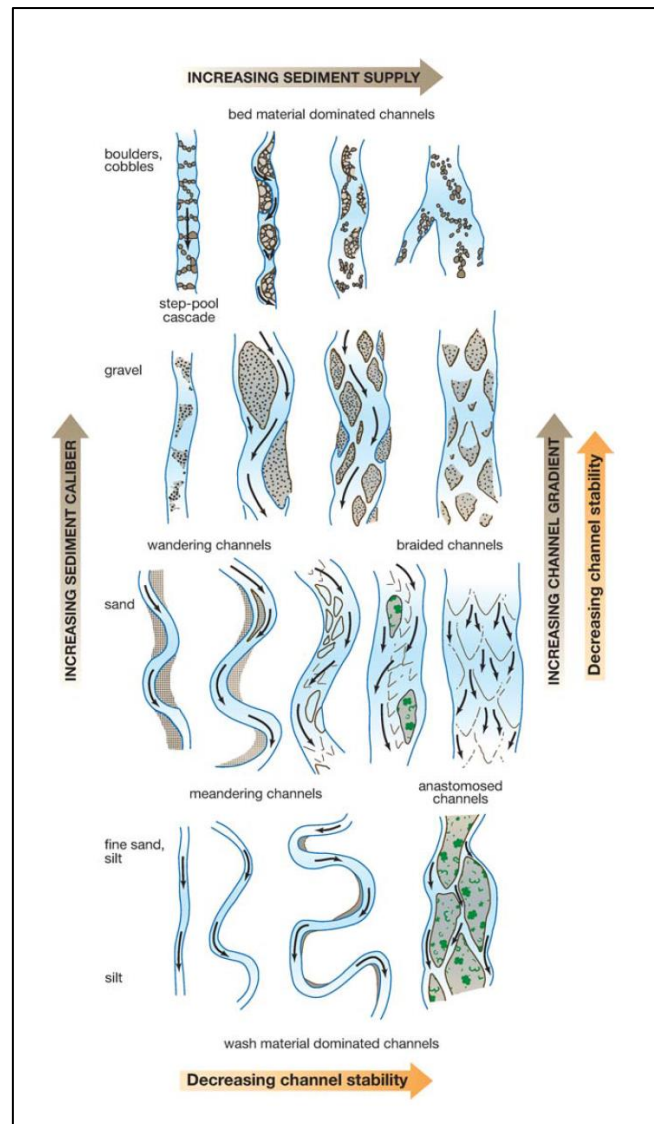


Figure 12. Évolution des styles fluviaux en fonction de la pente et du débit morphogène (Church, 2002)

**Figure 13. Classification des styles fluviaux de Church (2006) en fonction du volume de la charge sédimentaire, de la taille des sédiments et de la stabilité des formes.**



Tous ces auteurs s'accordent sur le fait que l'emprise spatiale des secteurs fonctionnels est régie par une rupture des conditions hydromorphologiques qui se manifeste par une modification significative d'une ou plusieurs variables de contrôle (*e.g.*  $Q_t$  ou  $Q_s$ , par exemple aux niveaux de confluences ou d'apports sédimentaires significatifs) ou des contraintes à l'ajustement (*e.g.* largeur de vallée, résistance des berges, ripisylve, etc...) et qui provoquent des changements de l'intensité voire du types de processus (*e.g.* dépôt de sédiment et élargissement du lit en sortie de gorges ou secteurs contraints, etc...) ainsi que de la répartition et/ou de la nature des formes fluviales. À l'échelle des secteurs fonctionnels, la caractérisation des flux à la fois liquide et solide est cruciale pour la compréhension de leurs fonctionnements propres ainsi que pour déterminer les relations génétiques que les formes fluviales entretiennent avec le transport de la charge de fond (Liébault, 2003). Aussi l'étude du charriage trouve à cette échelle son domaine de prédilection.

### 1.1.3.3 Les macroformes alluviales

À une échelle spatio-temporelle inférieure aux tronçons fonctionnels, les formes fluviales sont des structures sédimentaires de tailles variables (Tableau 1). Elles sont constituées de volumes sédimentaires plus ou moins importants mis en place par le charriage des particules lors des crues, modelant une topographie du lit très variable, et migrent plus ou moins rapidement vers l'aval (Malavoi et Bravard, 2010). Les formes alluviales constituent à la fois des unités de stockage et reflètent des formes de transport des sédiments fluviaux (Malavoi *et al.*, 2011). Elles influencent également la répartition spatiale des écoulements dans le lit et des échanges, d'eau et d'énergie, entre le lit et le substrat. En fait, il existe probablement une rétroaction entre écoulements et formes du lit.

Types	Échelle de taille	Longueur d'ondes (m)	Temps de réponse	Formes typiques	Contrôles
Microformes	Particule	$10^{-1}$ - $10^{-2}$	instantané		Conditions hydrauliques locales
Mésoformes	Profondeur de la lame d'eau	$10^{-1}$ - $10^2$	$\approx t$	- Amas de particules - Seuils - Marches à blocs - Stries de graviers	Conditions hydrauliques locales
Macroformes	Largeur du lit	$10$ - $10^3$	$\geq t$  $\gg t$	- Nappe de graviers - Bancs isolés - Bancs multiples	Régime géomorphologique
Mégaformes	Plusieurs largeurs de lit	$> 10^3$	T	- Assemblages de bancs	Régime géomorphologique

**Tableau 1. Classification hiérarchique des formes sédimentaires propres aux rivières à charge graveleuse (simplifié de Hoey, 1992 par Liébault, 2003).**

*Notes : t représente le temps de passage d'une crue, T le temps au niveau duquel se conçoit l'équilibre dynamique du système fluvial.*

Les formes fluviales les plus fréquemment observées dans les rivières à charge graveleuse sont les nappes ou langues de charriage, les seuils, les bancs (*bars*) et en marge du lit mineur : les berges sujettes à l'érosion. Les bancs sont souvent qualifiés par un ou plusieurs adjectifs relatifs à (Fort *et al.*, 2015):

- leurs positions dans le chenal : *e.g.* médians (*mid-channel bar*), de convexité (*point bar*), latéraux (*lateral*) ;
- leurs répartitions dans le chenal : isolés, multiples, alternés ;
- leurs orientations par rapport à l'écoulement : *e.g.* diagonal, transversal, longitudinal ;
- la granulométrie des sédiments qui les composent : *e.g.* de gravier (*gravel*), de sable (*sand*), ... ;



- leurs stades de végétalisation.

Lorsqu'elles ne sont pas stabilisées par la végétation ou que la puissance fluviale excède la capacité de stabilisation de la végétation, les formes fluviales migrent ou voient les sédiments qui la composent migrer vers l'aval et être renouvelés par les particules provenant de l'amont. Les formes fluviales esseulées ont plutôt tendance à migrer tandis que si la charge solide est abondante et qu'elles ne sont pas esseulées, ce sont plutôt les particules sédimentaires qui migrent d'une macroforme en amont vers une autre macroforme en aval. Ce mode de migration a été notamment mis en évidence par Yalin et Silva (2001), cités dans Malavoi *et al.* (2011). La mobilité des formes alluviales contribue au bon fonctionnement écologique des cours d'eau car elle influence l'organisation spatiale des habitats aquatiques (Dorava *et al.*, 2001) et la répartition des flux liquides entre le lit et l'hyporhéos.

#### **1.1.3.4 La particule sédimentaire**

L'échelle spatiotemporelle la plus fine est celle de la particule sédimentaire. À cette échelle, l'étude du transport solide fait intervenir des disciplines telles que la physique des particules et la mécanique des fluides et se concentre autour de deux axes majeurs.

- Le premier de ces axes analyse la mobilité de la particule et cherche à déterminer les facteurs qui l'influencent et comment ces facteurs interagissent entre eux.
- Le second axe étudie la transformation des particules au cours de leur transport par abrasion et fracturation : par quel(s) processus, à quelle(s) vitesse(s) ou quelle(s) intensité(s) et sous le contrôle de quel(s) facteur(s) s'opère(nt) ces transformations.

Les enseignements obtenus à cette échelle sont ensuite rapprochés des observations à plus large échelle afin de comprendre comment est façonnée la charge sédimentaire depuis son entrée dans le système fluvial et à mesure qu'elle transite dans le système puis d'étudier par l'intermédiaire de quels les processus elle concoure à la création des macroformes fluviales et aux développements des styles fluviaux.

La caractérisation d'une particule sédimentaire repose sur quatre concepts indépendants : la *taille*, la *forme*, l'*émoussé* et la *texture de surface*.

#### **1.1.4 Synthèse sur le rôle du transport solide dans le système fluvial**

Le système fluvial est à la fois un concept et un outil qui permet d'appréhender les processus physiques qui régissent le fonctionnement d'un cours d'eau, et ce à différentes échelles spatio-temporelles. Les caractéristiques de la charge sédimentaire et les modalités de son transit :

- sont les éléments centraux pour la discrimination de styles fluviaux et la caractérisation de leurs dynamiques propres,
- concourent à la perpétuelle évolution de la mosaïque des paysages fluviaux,
- influencent le fonctionnement de la zone hyporhéique, support de développement des écosystèmes benthiques (à la surface) et hyporhéiques,
- représentent un enjeu majeur pour la gestion des ouvrages dans les systèmes anthropisés,

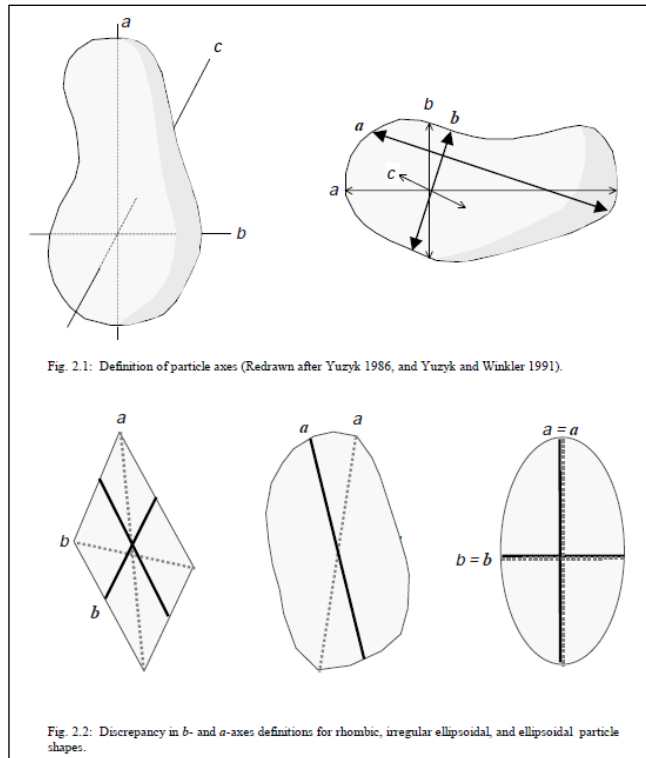
C'est pourquoi l'étude de la charge alluviale grossière et du transport solide (la détermination des flux de sédiments et les propriétés propres à la particule qui influencent sa mobilité) sont indispensables à la géomorphologie fluviale au sens large. Elle permet de comprendre le fonctionnement des systèmes fluviaux actuels mais aussi, en transposant de tels enseignement aux formations sédimentaires, leurs fonctionnements passés. Ainsi, la caractérisation des particules de la charge alluviale grossière et du transport solide seront plus spécifiquement abordés dans les parties suivantes.

## 1.2 LES CARACTÉRISTIQUES D'UNE PARTICULE SÉDIMENTAIRE

Dans la section précédente, nous avons vu que la charge sédimentaire, et notamment sa mobilité, représente une composante fondamentale de l'étude des systèmes fluviaux, de leurs fonctionnements, des processus qui y participent et façonnent *in fine* les macroformes fluviales. Avant d'aborder le transport de la charge sédimentaire grossière, ce travail présentera les caractéristiques qui sont utilisées pour la décrire. L'objectif de cette partie est de définir les termes, les métriques et les outils employés ensuite pour décrire la charge sédimentaire. Les processus qui régissent la mobilité de la charge et de la particule sédimentaire, les facteurs qui la contrôlent et les effets de cette mobilité sur les particules sédimentaires seront abordés ici mais détaillés dans la troisième partie.

### 1.2.1 La taille de la particule sédimentaire, la granulométrie d'un échantillon.

Une particule sédimentaire est un objet physique dans l'espace (la perception que nous en avons par notre vision nous fait le définir en 3 dimensions mutuellement orthogonales). Une particule sédimentaire est donc logiquement définies selon 3 axes correspondant à sa longueur (axe  $a$ ), sa largeur (axe  $b$ ) et son épaisseur (axe  $c$ ). L'agencement des axes les uns par rapport aux autres est différent selon les auteurs (Figure 14). Beaucoup retiennent (Bunte et Apt, 2001) la définition de Yuzyk et Winkler (1991) qui considèrent que les axes  $b$  et  $c$  doivent tous deux être perpendiculaires à l'axe  $a$ . L'autre définition proposée par Gordon *et al.* (1992) considère l'axe  $b$  comme étant l'axe le plus court du plan de projection maximale de la particule et perpendiculaire à l'axe  $c$ . Mais cette dichotomie n'est vraiment problématique que lorsqu'on mesure des particules de forme rhombique. Dans le cas des formes elliptiques les axes- $b$  calculés selon les deux règles indiquées précédemment se confondent. L'axe- $b$  est la mesure de la taille de particules la plus fréquemment utilisée que ce soit pour rendre compte de la granulométrie d'un tronçon de cours d'eau, pour modéliser le transport sédimentaire au travers de formules mathématiques ou pour approcher la rugosité du fond du lit en ingénierie hydraulique. Lorsqu'on cherche à rendre compte de manière synthétique de la granulométrie d'un échantillon, on présente la valeur d'un ( $D_{50}$  : *e.g.* la médiane de la distribution) ou plusieurs quantiles spécifiques ( $D_{10}$ ,  $D_{16}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{84}$ ,  $D_{90}$  pour ne citer que les plus utilisés) de la courbe granulométrique (*Grain Size Distribution* ou GSD), c'est-à-dire la courbe des fréquences cumulées des axes- $b$ .



**Figure 14. Différences dans les définitions des axes a et b proposées par Yuzyk et Winklers (1991, lignes en pointillées) et Gordon *et al.* (1992, lignes solides) dans Bunte et Apt (2001).**

Lorsque l'échantillon est composé d'un très grand nombre de particules afin de satisfaire aux exigences statistiques relatives au nombre minimal de particules constituant un échantillon (Wolman, 1954; Hey et Thorne, 1983; Mosley et Tindale, 1985; Rice et Church, 1996), ou que les particules sont trop petites pour pouvoir être mesurées une à une au pied à coulisse, on peut avoir recours à un échantillonnage volumétrique par tamisage. Les mailles des tamis déterminent des intervalles (entre le dernier tamis par lequel les particules ont pu passer et celui par lequel elles n'ont pas pu passer) qui correspondent aux bornes des classes granulométriques de Wentworth (1922 ; Tableau 2). On pèse alors la masse de chaque fraction granulométrique. Les bornes de chaque classe granulométrique de Wentworth sont établies pour augmenter d'un facteur 2 car les fréquences de taille de particules dans les lits fluviaux graveleux tendent à présenter une distribution logarithmique. Ainsi lorsqu'on présente la distribution des particules par classes de taille, on tend à obtenir une distribution normale ce qui est statistiquement plus commode (Bunte et Apt, 2001). L'échelle granulométrique linéaire (*e.g.* en mm) engendre un effet de taille important sur la moyenne arithmétique d'un échantillon ce qui complique son interprétation (Rivière, 1977). Aussi, ont été définis des unités de mesure phi ( $\Phi$ ) et psi ( $\Psi$ ) de la granulométrie (Krumbein, 1934). Celles-ci correspondent au logarithme négatif et positif, de base 2 de la dimension des particules en millimètre (Kondolf et Piégay, 2003). Ces unités permettent de mieux discerner la répartition des sédiments respectivement fins et grossiers. L'unité phi ( $\Phi$ ) est pratique

lorsqu'on étudie la charge sédimentaire fine (< 1 mm) car sa valeur augmente avec la diminution de la taille des sédiments. À l'inverse l'unité psi ( $\Psi$ ) est plutôt utilisée dans l'étude de la charge alluviale grossière car sa valeur augmente de pair avec la taille en millimètre des sédiments.

Description of particle size		$\Phi = -\log_2$	mm	$\Psi = \log_2$
		<b>-12,0</b>	<b>4096</b>	<b>12,0</b>
	very large	-11,5	2896	11,5
		<b>-11,0</b>	<b>2048</b>	<b>11,0</b>
	large	-10,5	1448	10,5
<b>Boulder</b>		<b>-10,0</b>	<b>1024</b>	<b>10,0</b>
	mediul	-9,5	724	9,5
		<b>-9,0</b>	<b>512</b>	<b>9,0</b>
	small	-8,5	362	8,5
		<b>-8,0</b>	<b>256</b>	<b>8,0</b>
	large	-7,5	181	7,5
<b>Cobble</b>		<b>-7,0</b>	<b>128</b>	<b>7,0</b>
	small	-6,5	90,5	6,5
		<b>-6,0</b>	<b>64</b>	<b>6,0</b>
	very coarse	-5,5	45,3	5,5
		<b>-5,0</b>	<b>32</b>	<b>5,0</b>
	coarse	-4,5	22,6	4,5
		<b>-4,0</b>	<b>16</b>	<b>4,0</b>
<b>Gravel</b>	medium	-3,5	11,3	3,5
		<b>-3,0</b>	<b>8</b>	<b>3,0</b>
	fine	-2,5	5,66	2,5
		<b>-2,0</b>	<b>4</b>	<b>2,0</b>
	very fine	-1,5	2,83	1,5
		<b>-1,0</b>	<b>2</b>	<b>1,0</b>
	very coarse	-0,5	1,41	0,5
		<b>0,0</b>	<b>1</b>	<b>0,0</b>
	coarse	0,5	0,707	-0,5
		<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>-1,0</b>
<b>Sand</b>	medium	1,5	0,354	-1,5
		<b>2,0</b>	<b>0,25</b>	<b>-2,0</b>
	fine	2,5	0,177	-2,5
		<b>3,0</b>	<b>0,125</b>	<b>-3,0</b>
	very fine	3,5	0,088	-3,5
		<b>4,0</b>	<b>0,063</b>	<b>-4,0</b>
<b>Silt</b>		<b>8,0</b>	<b>0,0039</b>	<b>-8,0</b>
<b>Clay</b>		<b>12,0</b>	<b>0,00024</b>	<b>-12,0</b>

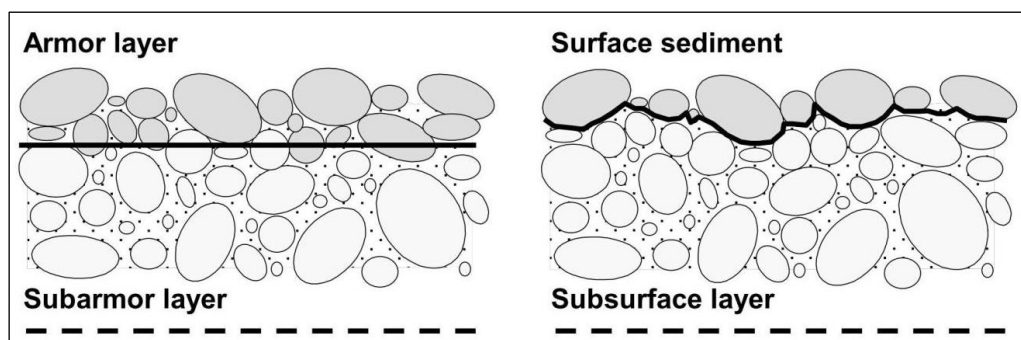
**Tableau 2. Classes granulométriques de Wentworth (1922).**

L'acquisition de données granulométriques est soumise à une série de compromis liée à des raisons pratiques, de moyens, des questions de temps et de perturbation du milieu. Il est évidemment impossible de mesurer l'axe b de toutes les particules d'un cours d'eau avec un pied à coulisse d'autant que l'utilisation d'un pied à coulisse peut se révéler très chronophage et/ou soumis à un biais opérateur.

On distingue souvent deux méthodes pour échantillonner au sol le matériel composant le lit des rivières graveleuses :

- les échantillonnages surfaciques pour lesquels un nombre défini de particules est prélevé à la surface d'une zone prédéfinie.
- les échantillonnages sub-surfaciques pour lesquels un volume ou une masse est, pour des considérations pratiques de mesure, prélevé sur une certaine épaisseur sédimentaire.

L'existence de ces deux méthodes repose sur le fait que la plupart des patrons granulométriques qu'on peut observer, présentent une structuration verticale, opposant couches de surface et subsurface (Figure 15). Cette structuration est liée au processus de « vannage vers l'aval » (*downstream winnowing*) et à de micro mouvements verticaux (Urbonas (1968) et Stevens (1969) in Schumm et Stevens (1973)) de faibles amplitudes mais à grandes fréquences. Le vannage vers l'aval se produit en fin de crue lorsque la diminution des débits entraîne le dépôt des particules grossières tandis que les particules plus fines restent en mouvement ou lorsque des crues d'intensité faible à moyenne ne parviennent pas à mobiliser l'ensemble des particules et exportent préférentiellement les plus petites (Gomez, 1984; Richards et Clifford, 1991; Kondolf et Piégay, 2003). Le phénomène, observé sur la plupart des cours d'eau à charge sédimentaire graveleuse (Whiting et King, 2003), tend à produire une couche d'armure protégeant la matrice plus fine de la couche de subsurface.



**Figure 15. Stratification granulométrique d'un lit armuré (Bunte et Apt, 2001).**

Si le phénomène d'armurage se poursuit et s'accroît, on peut assister à la formation d'un pavage, c'est-à-dire d'une couche très grossière que seule une crue d'intensité exceptionnelle pourra éventuellement briser (Bray et Church, 1980; Parker et Klingeman, 1982; Richards et Clifford, 1991; Bravard et Petit, 1997). En général, on utilise un rapport entre les valeurs médianes d'axe b de la couche de surface et de subsurface pour caractériser le degré d'intensité du phénomène. Même si certains auteurs (Kellerhals et Bray, 1971;

Buffington, 1996) ont proposé des solutions alternatives, la granulométrie de la subsurface est préférentiellement déterminée par des méthodes d'échantillonnage volumétrique ou massique.

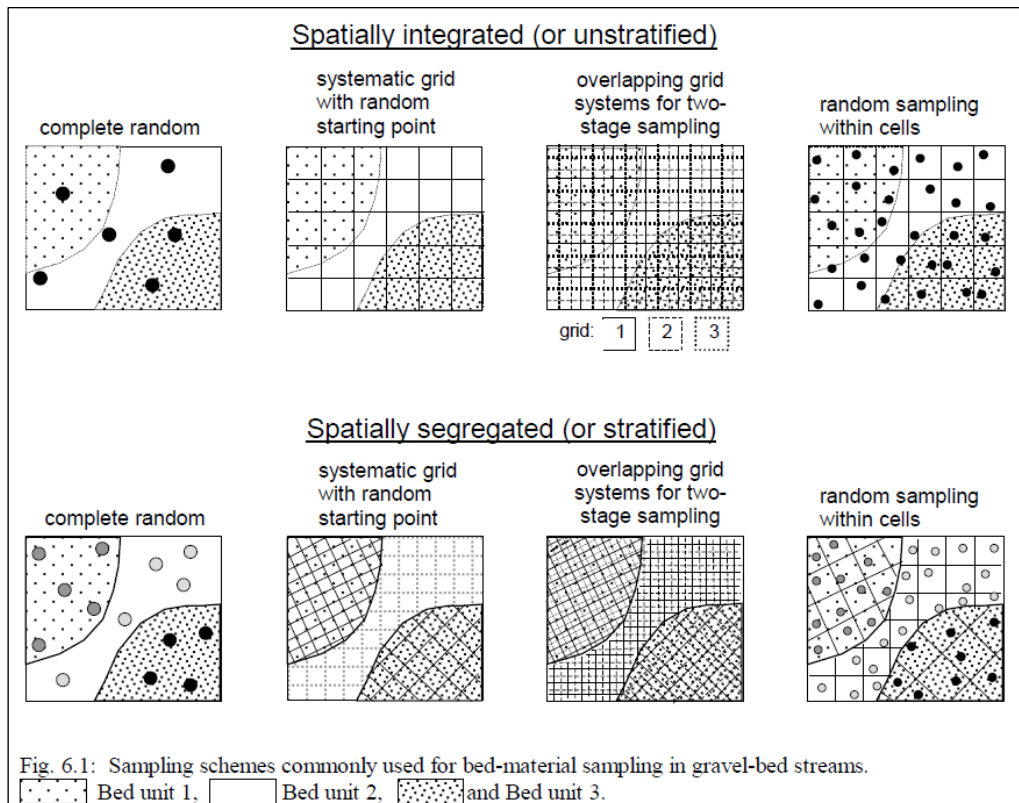
L'échantillonnage volumétrique consiste à prélever un grand volume de particules (ce volume est fonction du diamètre  $D_{max}$  ou de la masse de la plus grosse particule de l'échantillon (Church *et al.*, 1987)) que l'on peut mesurer sur place par gabarit ou pied à coulisse pour les plus grosses particules, par tamisage sur le terrain pour les plus nombreuses ou en laboratoire pour les plus petites ( $< 11$  ou  $8$  mm). Les différentes fractions granulométriques sont finalement pesées. Les prélèvements de particules peuvent être réalisés suivant de nombreux protocoles (à l'aide de pelles, de carottage à l'azote liquide, etc... Bunte et Apt, 2001).

L'échantillonnage surfacique peut être réalisé selon plusieurs méthodes :

- Le comptage de particules (*pebble counts*) consiste à sélectionner aléatoirement un nombre défini de particules à espacement régulier le long de transects répartis sur une surface d'échantillonnage plus ou moins grande (la centaine de mètres carrés). Cette méthode est particulièrement déployée dans les rivières à charge grossière dans lesquelles on peut négliger la part de particules fines (*e.g.*  $< 5$  mm) qui sont difficiles à sélectionner et ramasser à la main. Parmi les protocoles « pebble counts » les plus utilisés on peut citer notamment la méthode Wolman (1954).
- Le comptage par grille (*grid counts*) consiste à prélever des particules aux points de croisement des mailles d'un quadrillage à espacement régulier sur une surface relativement petite (1 à 10 m<sup>2</sup>). Les particules peuvent être prélevées puis mesurées à la main ou mesurées à partir de photographies.
- L'échantillonnage aréolaire (*areal samples*) consiste à prélever puis mesurer toutes les particules présentes sur une petite surface d'investigation (jusqu'à 1m<sup>2</sup>). Pour cela on a recours à de la peinture (*paint-and-pick*), à des adhésifs ou à des photographies.

La question de la représentativité d'un échantillon est également très importante puisque sur le terrain, la granulométrie présente une variabilité spatiale parfois forte entre des unités spatiales au patron granulométrique relativement homogène, au sein d'une macroforme (transition amont-aval) ainsi qu'entre macroformes. De même la présence d'obstacle peut provoquer des conditions d'écoulement locales qui engendrent un dépôt préférentiel des particules grossières à l'amont et des plus fines à l'aval (Bisson *et al.*, 1987; Thompson, 1995; Rice, 1995; Rice et Church, 1996; Buffington et Montgomery, 1999). C'est pourquoi, Bunte et Apt (2001), notamment, ont proposé plusieurs plans d'échantillonnage (Figure 16):

- Spatialement intégré ou non-stratifié (*Spatially integrated/unstratified*). L'espace est appréhendé de manière homogène, sans discrimination d'unité homogène.
- Spatialement discriminé ou stratifié (*Spatially segregated/stratified*). L'espace est découpé en unités granulométriquement homogènes (*e.g.* des macroformes) au sein desquelles la même procédure d'échantillonnage est répétée.
- Spatialement centré vers des zones d'intérêt (*Spatially focused*).



**Figure 16. Schémas d'échantillonnage communément utilisés pour l'échantillonnage des cours d'eau à charge grossière (Bunte et Apt, 2001).**

La photographie numérique a permis l'accélération du développement de méthodes pour caractériser la granulométrie de macroformes à divers échelles spatiales grâce à des prises de vue aériennes ou au sol et à leur traitement automatisé. Le principe est d'utiliser un ou plusieurs repères sur la photographie ou bien la hauteur de prise de vue pour mesurer ou calculer l'emprise spatiale de la photographie puis des éléments imagés. Les travaux pionniers utilisaient des photographies argentiques (Kellerhals et Bray, 1971; Adams, 1979; Ibbeken et Schleyer, 1986) pour caractériser la granulométrie de surfaces de petites tailles (*e.g.* 1 à 2 m<sup>2</sup>). La résolution croissante des capteurs numériques a permis d'embarquer ces capteurs sur des engins volants (avion, ULM ou encore drone) pour réaliser des prises de vue de très grandes scènes (*e.g.* plusieurs kilomètres carrés) et caractériser la granulométrie jusqu'à l'échelle du

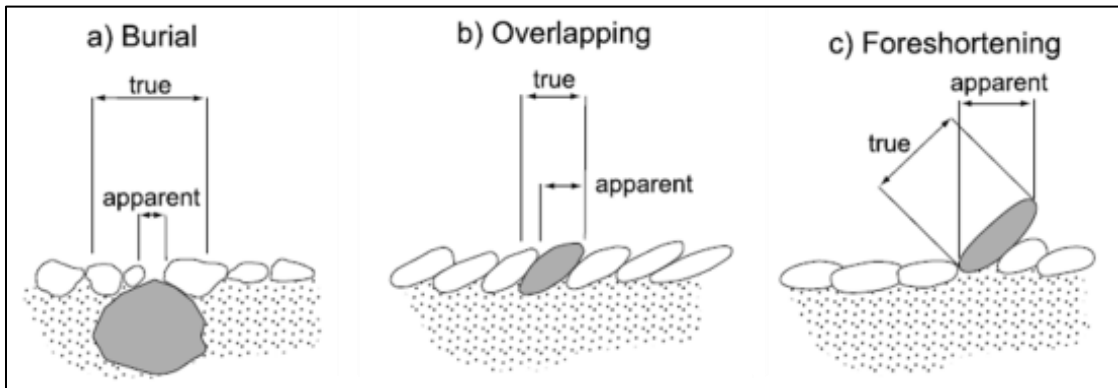


réseau hydrographique (Carbonneau *et al.*, 2004, 2005; Black, 2013; Black *et al.*, 2014). La scène, c'est-à-dire l'emprise spatiale, de la photographie est fonction de la hauteur de prise de vue et de la longueur de focale de la lentille. La scène représente un compromis entre la résolution au sol en millimètre par pixel (*e.g.* en mm/pxl) et l'emprise spatiale de la photographie. En effet, le nombre photosites du capteur conditionne la définition maximale de la photographie en pixel. Plus on augmente la hauteur de prise de vue, plus la résolution au sol (*e.g.* le nombre de millimètre par pixel augmente) et la définition des particules les plus petites (*e.g.* le nombre de pixels représentant ces particules) diminuent.

Les méthodes de traitement des photographies sont toutes basées sur l'analyse des contrastes (Carbonneau *et al.*, 2003, 2005; Carbonneau, 2005; Verdú *et al.*, 2005; Graham *et al.*, 2005a, 2005b, 2005c, Buscombe *et al.*, 2008, 2010; Carbonneau *et al.*, 2009; Graham *et al.*, 2010; Lejot *et al.*, 2011; Carbonneau *et al.*, 2012; Buscombe et Rubin, 2012a, 2012b, Carbonneau et Piégay, 2012a, 2012b; Black *et al.*, 2014; Buscombe *et al.*, 2014c) ou des domaines spectraux des photographies (Rubin, 2004; Warrick *et al.*, 2009; Buscombe *et al.*, 2010) par des programmes informatiques. Les traitements sur ordinateur sont variés : délimitation manuelle ou automatisée du contour des particules, analyse des contrastes par matrice de corrélation ou par ondelettes. À large échelle, ces méthodes permettent de cartographier des unités spatiales de surface à la granulométrie homogène et puis d'en déterminer les quantiles spécifiques. Ces approches constituent un champ de recherche en pleine effervescence tant pour la conception de dispositifs d'acquisition (drones aériens ou aquatiques) que pour le traitement automatisé ou semi-supervisé des photographies, car elles permettent potentiellement une collecte rapide et à large échelle de données granulométriques. La méthode présente toutefois l'inconvénient de ne se baser que sur un visuel en deux dimensions sensible à l'agencement des particules (Graham *et al.*, 2010 ;

Figure 17). C'est pourquoi certains chercheurs testent de nouvelles approches fondées sur les trois dimensions :

- telles que la SFM (*Structure From Motion*) et la MVS (*Multi View Stereo*) qui permettent de reconstituer des scènes en 3 dimensions et potentiellement de dépasser le problème de l'agencement des particules,
- Ou l'usage de radars acoustiques (Buscombe *et al.*, 2014a, 2014b, 2015)



**Figure 17. Illustration des trois sources potentielles de sous-estimation de la taille de particules sédimentaires par photographie (Graham *et al.*, 2010).**

*Notes : (a) enfouissement partiel, (b) recouvrement partiel résultant de l'imbrication des particules et (c) projection sur le plan horizontal d'une particule inclinée.*

Les valeurs des axes a et b présentent des différences liées à la manière dont l'information est exprimée (Bunte et Apt, 2001). Dès 1971 Kellerhals et Bray ont compilé les différentes méthodes de collecte et de traitement pour établir comment ont été converties les données obtenues afin d'obtenir des équivalences. Ces facteurs de conversion ont été mis à jour récemment (Graham *et al.*, 2012) afin de pouvoir comparer des données aux unités de mesures différentes et produites par les différentes méthodes d'échantillonnages (Tableau 3 et Tableau 4).

Conversion de → à	Factor
<b><u>Différences entre méthodes d'analyse :</u></b>	
Fréquence de masse → Fréquence de nombre	$1/D^3$
Fréquence de nombre → Fréquence de masse	$D^3$
<b><u>Différences entre méthodes d'échantillonnage :</u></b>	
Volume → Grille ( <i>Volume → Grid</i> )	$D^3$
Grille → Volume ( <i>Grid → Volume</i> )	$1/D^3$
Volume → Surface ( <i>Volume → Area</i> )	$D$
Surface → Volume ( <i>Area → Volume</i> )	$1/D$
Surface → Grille ( <i>Area → Grid</i> )	$D^2$
Grille → Surface ( <i>Grid → Area</i> )	$1/D^2$

**Tableau 3. Conversion entre méthodes d'analyse et d'échantillonnage granulométrique**

### *Conversion à*

<i>Conversion de</i>	Volume exprimé en masse ( <i>Volume-by-weight</i> )	Grille exprimé en nombre ( <i>Grid-by-number</i> )	Grille exprimée en masse ( <i>Grid-by-weight</i> )	Surface exprimée en nombre ( <i>Area-by-number</i> )	Surface exprimée en masse ( <i>Area-by-weight</i> )
Volume par masse	1	1	$D^3$	$1/D^2$	$D$
	0	0	3	-2	1
Grille par nombre	1	1	$D^3$	$1/D^2$	$D$
	0	0	3	-2	1
Grille par masse	$1/D^3$	$1/D^3$	1	$1/D^5$	$1/D^2$
	-3	-3	0	-5	-2
Surface par nombre	$D^2$	$D^2$	$D^5$	1	$D^3$
	2	2	5	0	3
Surface par masse	$1/D$	$1/D$	$D^2$	$1/D^3$	1
	-1	-1	2	-3	0

**Tableau 4. Facteurs de conversion entre différentes méthodes d'analyse et échantillonnage.**

#### 1.2.1.1 Conclusion

Il existe deux approches pour collecter un échantillon de particules sédimentaires dont on souhaite connaître la taille. On peut prélever :

- Un volume de particules non-individualisées ;
- Ou un nombre de particules individualisées : à intervalle déterminé (e.g. *Grid*) ou sur l'ensemble d'une surface (e.g. *Area*) ;

Et l'information obtenue peut être exprimée ou analysée sous la forme de

- de valeurs (*number*) par particule ou par classes granulométriques (axe-b),
- ou de masses (*weight*) par classes granulométriques.

### 1.2.2 La forme et l'éroussé

L'analyse de la forme et de l'éroussé des particules répond à 5 objectifs :

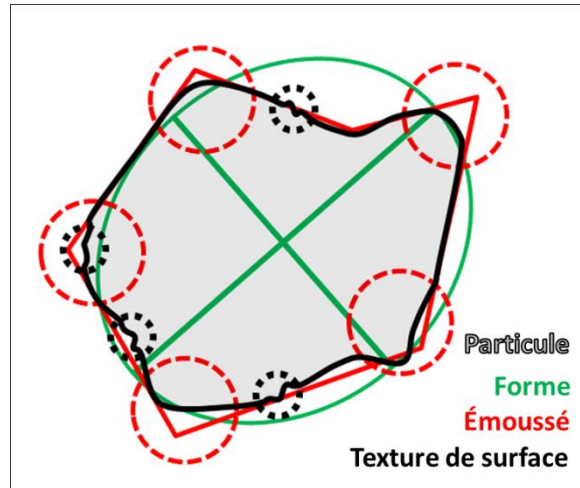
- (1) en sédimentologie, pour décrire du matériel sédimentaire (Wadell, 1932; Benn et Ballantyne, 1994; Lukas *et al.*, 2013) ;
- (2) pour comprendre des événements du passé et reconstituer l'histoire des matériaux (Wentworth, 1921; Wadell, 1932; Illenberger, 1991; Illenberger et Reddering, 1993; Graham et Midgley, 2000a; Szabó *et al.*, 2015) ;
- (3) pour identifier les sources des sédiments (Knighton, 1982; Lindsey *et al.*, 2007; Roussillon *et al.*, 2009; Bertoldi *et al.*, 2012; Miller *et al.*, 2014) ;
- (4) pour analyser (Wentworth, 1919; Krumbein, 1941a, 1941b; Kuenen, 1956; Ashcroft, 1990; Wald, 1990; Yazawa, 1990) et modéliser les processus d'abrasion des particules (Durian *et al.*, 2006; Szabó, 2013; Domokos et Gibbons, 2013; Domokos *et al.*, 2014) ;
- (5) pour déterminer leur influence sur la mobilité des particules sédimentaires (Krumbein, 1942; Komar et Li, 1986; Ashworth et Ferguson, 1989; Kirchner *et al.*, 1990; Carling *et al.*, 1992; Schmidt et Gintz, 1995; Sear *et al.*, 2008; Stark *et al.*, 2014), leur implication dans l'agencement des particules (Wittenberg, 2002; Stark *et al.*, 2014) ou la développement de couches d'armurage (Gomez, 1994) et donc *in fine* sur le transport solide.

#### 1.2.2.1 Distinction forme/éroussé

La distinction entre forme et éroussé a été au cœur d'un débat de plusieurs décennies (Blott et Pye, 2008). De fait, nous avons choisi d'aborder ces deux concepts au sein d'une même section tant les terminologies employées ont été ambiguës (*e.g.* le terme de sphéricité) et les concepts, relativement indissociables. Même si certains auteurs ont toujours été vigilants, considérant séparément forme et éroussé (Lees, 1964a; Smalley, 1967), il a fallu attendre les travaux de Barrett (1980) pour que soit proposée une classification hiérarchisée dans laquelle forme, éroussé et texture de surface sont 3 propriétés indépendantes bien définies (Figure 18).

Barrett a proposé que :

- La forme d'une particule sédimentaire (*form* ou *shape* dans la littérature anglo-saxonne post 1980) se réfère à ses caractéristiques en 3 dimensions indépendamment de sa taille.
- L'éroussé (*roundness*) se réfère au degré d'arrondissement des angles et des sommets de la particule. Il est fréquemment opposé à l'angularité (*sharpness* ou *angularity*).
- La texture de surface dépend d'éléments de surface de petites dimensions par rapport à la taille de la particule.



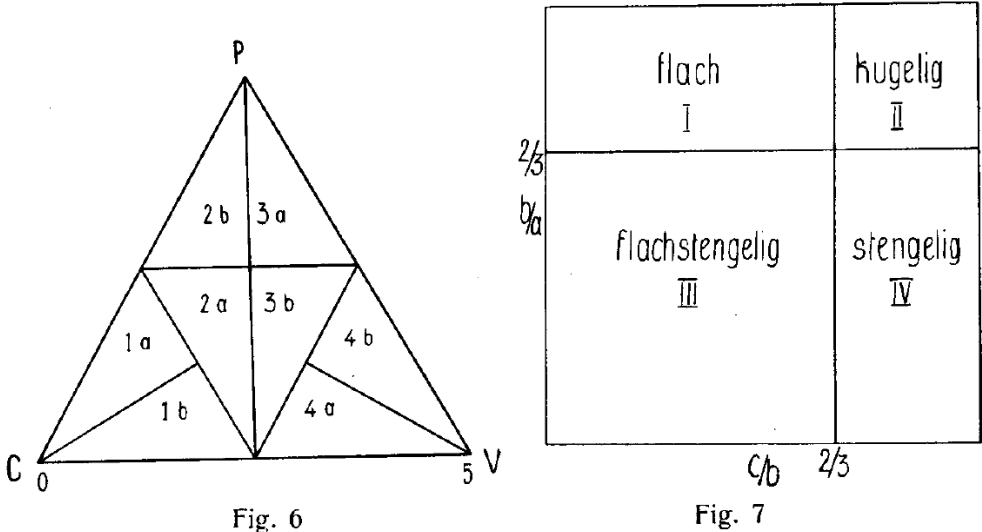
**Figure 18. Distinction entre forme, éroussé et texture de surface (d'après Barrett, 1980).**

### 1.2.2.2 La forme

La forme d'une particule est traditionnellement définie par les longueurs relatives des axes  $a$ ,  $b$  et  $c$  au travers d'indices reposant sur des classifications de formes. Sans être exhaustif, nous allons présenter quelques-uns des indices et des classifications rencontrés dans la littérature afin de rendre compte de leur intérêt, de leurs spécificités et des motivations avancées pour justifier de leur singularité. On peut distinguer deux types d'indice de forme selon le nombre de dimensions des particules prise en compte. Briggs (1977) justifiait de cette distinction en affirmant que la forme en deux dimensions des particules (*e.g.* obtenue à partir du plan de projection maximale définit par les axes  $a$  et  $b$  des particules) est principalement contrôlée par le type et l'intensité des processus de météorisation puis d'abrasion pendant le transport, alors que la forme en 3 dimensions est plutôt liée à la structure du matériel liée à la lithologie de la roche mère.

Les indices de formes en deux dimensions les plus intuitifs sont l'élongation et l'aplatissement. L'élongation correspond à la largeur rapportée à la longueur de la particule (*e.g.*  $b/a$ ) (Schneiderhöhn, 1954; Folk, 1980). L'aplatissement correspond à l'épaisseur rapportée à la longueur de la particule (*e.g.*  $c/a$ ). Ces indices ont notamment permis à (Zingg, 1935) de différencier 4 types et 8 sous-types de formes illustrés par ses fameux diagrammes (Figure 19), qui furent ensuite repris et adaptés par de nombreux auteurs. Il existe aussi tout une série d'indices plus élaborés qu'on peut assimiler à des descripteurs de la circularité des

particules (parfois nommés sphéricité ou émoussé). La littérature publiée ensuite a montré que cette terminologie n'était pas appropriée. Ces indices ne tiennent pas compte de l'angularité des sommets mais décrivent des nuances de différence ou de similarité de la silhouette de la particule par rapport à celle d'un cercle. Ils sont basés sur les paramètres de base que sont: l'aire et le périmètre de la particule (Pentland, 1927; Cox, 1927; Wadell, 1933; Janoo, 1998), le diamètre du plus petit cercle inscrit (Tickell, 1931; Wadell, 1935; Riley, 1941). Mais, la circularité est considérée comme un indice difficile à interpréter car il intègre des informations relatives à la taille, à la forme et à l'émoussé (Roussillon *et al.*, 2009).



**Figure 19. Diagrammes originaux des formes de Zingg (1935)**

Nom de l'indice ( <i>Index name</i> )	Propriété abordée	Formule	Description	Référence
Aplatissement de Wentworth ( <i>Flatness</i> )	Forme	$\frac{a + b}{2c}$	Somme des axes a et b rapportée à 2 fois axe c	(Wentworth, 1922a)
Circularité de Cox ( <i>"Roundness" de Cox</i> )	Circularité	$\frac{4\pi A}{p^2}$	Aire de la particule rapportée à l'aire d'un cercle de même périmètre que la particule	Cox (1927)
Circularité de Pentland ( <i>"Roundness" de Pentland</i> )	Circularité	$\frac{4A}{\pi(a^2)}$	Aire de la particule rapportée à l'aire d'un cercle de diamètre égale à l'axe <i>a</i> de la particule	Pentland (1927)
Circularité de Tickell ( <i>"Roundness" de Tickell</i> )	Circularité	$\frac{4A}{\pi(D_k)^2}$	Aire de la particule rapportée à l'aire du plus petit cercle inscrit	Tickell (1931)
Sphéricité vraie de Wadell ( <i>true sphericity</i> )	Sphéricité	$\frac{s}{S} = \frac{(1)^3 \sqrt{b \cdot c}}{\sqrt{a^2}}$ (1) : d'après Sneed et Folk (1958)	Rapport entre la surface d'une sphère de même volume que la particule ( <i>S</i> ) et la surface de la particule ( <i>s</i> )	Wadell (1932)
Circularité de Wadell : <i>c/C</i> Note = Racine carrée de circularité de Cox	Circularité	$\sqrt{\frac{4\pi A}{b^2}}$	Rapport entre diamètre du cercle de même aire que la particule et celui du cercle circonscrivant la particule	Wadell (1933)
Circularité : <i>d<sub>c</sub>/D<sub>c</sub></i>	Circularité	$\sqrt{\frac{4A}{\pi(D_k)^2}}$	Rapport entre diamètre du cercle de même aire que la particule et celui du cercle circonscrivant la particule	Wadell (1935)
Élongation ( <i>elongation</i> )	Forme	= <i>b/a</i>	Rapport axe <i>b</i> sur axe <i>c</i>	Zingg (1935)
Aplatissement ( <i>flatness</i> )	Forme	= <i>c/a</i>	Rapport axe <i>c</i> sur axe <i>a</i>	Zingg (1935)

Nom de l'indice ( <i>Index name</i> )	Propriété abordée	Formule ( <i>Formulae</i> )	Description	Référence ( <i>Reference</i> )
Sphéricité de Krumbein ( <i>Sphericity</i> )	Forme	$\Psi = \sqrt[3]{\frac{b \cdot c}{a^2}}$	Racine cubique du rapport entre le produit des axes b et c au numérateur et le carré de l'axe a au dénominateur	Krumbein (1941a) Pye et Pye (1943)
Indice de forme de Corey ( <i>Corey shape factor</i> )	Forme	$C = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}}$	Axe c rapporté à la racine carrée du produit entre axe a et axe b	Corey (1949)
Circularité de Riley ( <i>inscribed circle sphericity</i> )	Circularité	$\sqrt{\frac{D_i}{D_c}}$	Racine carrée du rapport diamètre du + grand cercle inscrit à la particule sur celui du cercle circonscrivant la particule	Riley (1941)
Sphéricité de projection maximale ( <i>Maximum Projection sphericity</i> )	Sphéricité	$\Psi_p = \sqrt[3]{\frac{c^2}{a \cdot b}}$	Racine cubique du rapport entre le carré de l'axe c au numérateur et le produit des axe b et c au dénominateur	Folk (1955) Sneed et Folk (1958)
Indice de forme de Sneed et Folk	Forme	$F = \frac{(a-b)}{(a-c)}$	Rapport des différences axe a et axe b au numérateur et entre axe a et c au dénominateur	Sneed et Folk (1958)
Sphéricité d'Aschenbrenner ( <i>Aschenbrenner working sphericity</i> )	Forme	$\Psi' = \frac{12.8 \sqrt[3]{P^2 Q}}{1 + P(1+Q) + 6\sqrt{1+P^2(1+Q^2)}}$ Où $P = c/b$ et $Q = b/a$		Aschenbrenner (1956)
Indice de forme d'Aschenbrenner	Forme	$F = \frac{a \cdot c}{b^2}$	Rapport entre le produit des axes a et c et le carré de l'axe b	Aschenbrenner (1956)
Indice de forme de Williams ( <i>Williams shape factor</i> )	Forme	$W = 1 - \frac{a \cdot c}{b^2}, \text{ si } b^2 > a \cdot c$ $W = \frac{b^2}{a \cdot c} - 1, \text{ si } b^2 \leq a \cdot c$		Williams (1965)



Nom de l'indice ( <i>Index name</i> )	Propriété abordée	Formule ( <i>Formulae</i> )	Description	Référence ( <i>Reference</i> )
Indice de forme de Janke ( <i>Janke form factor</i> )	Forme	$E = \frac{c}{\sqrt{\frac{a^2+b^2+c^2}{3}}}$		Janke (1966)
Indice d'aplatissement allongement ( <i>Oblate/Prolate index</i> )	Forme	$\frac{10 \left( \frac{a-b}{a-c} \right) - 0.5}{c/a}$		Dobkins et Folk (1970)
Indice d'allongement d'Illenberger ( <i>Rod Index</i> )	Forme	$\frac{c+b}{a}$	Rapport entre la somme des axe b et c sur l'axe a	Illenberger (1991)
Indice d'Illenberger	Forme	$\frac{a+c}{b}$	apport entre la somme des axe a et c sur l'axe b	Illenberger (1991)
Emoussé de Wentworth (1)	Emoussé	$\frac{D_k}{a_w}$	Rapport entre le diamètre de courbure du sommet le plus anguleux et l'axe a	Wentworth (1919)
Emoussé de Wentworth (2)	Emoussé	$\frac{D_k}{(a+b)/2}$	Rapport entre le diamètre de courbure du sommet le plus anguleux et le diamètre moyen	Wentworth (1922)
Emoussé de Wadell	Emoussé	$\frac{\sum D_r}{D_i} = \frac{\sum D_r}{n}$	Rapport entre la moyenne des rayons de courbures de tous les sommets et le rayon de courbure du plus grand cercle inscrit ( $D_i$ )	Wadell (1932) première formule
Emoussé de Wadell	Emoussé	$\frac{n}{\sum \frac{D_i}{D_r}}$	Rapport entre le rayon de courbure du plus grand cercle inscrit ( $D_i$ ) et la moyenne des rayons de courbure de tous les sommets	Wadell (1932) seconde formule

Nom de l'indice	Propriété	Formule ( <i>Formulae</i> )	Description	Référence ( <i>Reference</i> )
Circularité de Riley	Circularité	$\sqrt{\frac{D_i}{D_c}}$	Racine carrée du rapport entre le rayon du plus grand cercle inscrit ( $D_i$ ) et celui du cercle englobant la particule ( $D_c$ )	Riley (1941)
Emoussé de Cailleux	Emoussé	$\frac{D_k}{a_w} * 2000$	Rapp. entre le diamètre de courbure du sommet le + anguleux et l'axe $a$ , le tout multiplié par 2000	Cailleux (1947)
Emoussé de Kuenen	Emoussé	$\frac{D_k}{b}$	Rapp. entre le rayon de courbure du sommet le + anguleux et l'axe $b$ de la particule	Kuenen (1956)
Angularité de Lees	Emoussé	$A = \sum A_i$ Où $A_i = (180^\circ - \alpha) \frac{x}{D_i}$	Somme des degrés d'angularité de tous les angles. Où : $A_i$ : le degré d'angularité d'un sommet $\alpha$ : l'angle en degré du sommet $x$ : la dist. entre le sommet et le centre du + grand cercle inscrit $D_i$ : le rayon du + grand cercle inscrit	Lees (1964a, 1964b)
Emoussé de Dobkins et Folk	Emoussé	$\frac{D_k}{D_i}$	Rapp. entre le rayon de courbure du sommet le + anguleux ( $D_k$ ) et celui du + grand cercle inscrit ( $D_i$ )	Dobkins et Folk (1970)
Emoussé de Drevin	Emoussé	$\frac{A_{S \oplus C(0,r_c) \ominus C(0,r_c)}}{A_S}$	Rapp. entre l'aire d'une particule avant ( $A_S$ ) et après ( $A_S$ ) ouverture morphologique par l'élément $C$ de centre 0 et de rayon $r_c$	Drevin et Vincent (2002)

Nom de l'indice	Propriété	Formule ( <i>Formulae</i> )	Description	Référence ( <i>Reference</i> )
Emoussé de Blott et Pye	Emoussé	$I_{(2D)} = \sum \frac{y - x}{x}$	$x$ : dist. entre le centre du + grand cercle inscrit et le point le + proche d'une concavité $y$ : dist. entre le centre du plus + cercle inscrit et l'enveloppe convexe, mesurée selon le même axe et la même direction que $x$	Blott et Pye (2008)
L'indice d'émoussé	Emoussé	$\frac{P_g}{P_e}$	Rapport entre le périmètre de la particule ( $P_g$ ) et celui de l'ellipse la mieux approchante ( $P_e$ )	Cottet (2006)

**Tableau 5. Indices de formes, de sphéricité et d'émoussé communément utilisés.**

Les indices de formes en trois dimensions sont eux plus nombreux (Tableau 5). Wentworth (1922a) a défini un indice d'aplatissement basé sur les 3 axes d'une particule. Wadell (1932) a proposé un indice de sphéricité (indicateur de forme selon l'auteur) qui correspond à la surface d'une sphère de même volume que la particule divisée par la surface réelle de la particule. Mais, cet indice est difficile à calculer car la mesure de la surface réelle de la particule n'est pas facile à faire. Krumbein (1941a) a proposé un indice de sphéricité qui intègre les trois axes et ne nécessite pas une mesure de la surface de la particule. Il souligne que les particules sédimentaires tendraient vers une forme de sphère avec l'augmentation de la distance de transport et que par conséquent leur sphéricité et leur émoussé tendraient vers une valeur-seuil. Par contre, cet indice est assez peu représentatif des formes éloignées de la sphère. En effet, un indice de sphéricité de 0,3 ou 0,4 par exemple peut être obtenu tout à la fois pour un disque, une lame ou une baguette. Corey (1949) a proposé un indice de Sphéricité  $C$ , pour déterminer la vitesse de sédimentation d'une particule puisque, à masse égale, celle-ci dépend de la forme de la particule. Sneed et Folk (1958) ont proposé un indice de forme  $F$  qui fait la distinction entre les formes en disque ( $F < 0.33$ ), en ellipse ( $0.33 < F < 0.67$ ) et en tige ( $F > 0.67$ ). Ils l'ont associé à un indice de sphéricité effective qui est fonction de la forme des particules (indice de forme  $F$ ) et du degré de compacité (*e.g.* la compacité maximale est atteinte pour  $a = b = c$ ). Cet indice permet de souligner que pour un même degré d'aplatissement, une particule plate et compacte présente une plus grande résistance à la décantation qu'une particule allongée. Ce dernier indice se comporte de manière assez similaire à celui de Corey (1949).

#### 1.2.2.2.1 L'ambiguïté de la sphéricité

Le terme de sphéricité prête à confusion. Il y a une double ambiguïté attachée à ce terme :

- La première de ces ambiguïtés relève uniquement des formules de calcul qui font qu'un cube ou un parallélépipède rectangle obtiennent respectivement les mêmes valeurs de sphéricité qu'une sphère ou qu'une ellipse. Cette dernière ambiguïté avait déjà incité Sneed et Folk (1958) à employer le terme de « Compact » plutôt que sphère sur leur diagramme de classification et la nomenclature qui lui est associée, mais ils ont tout de même utilisé le terme de "sphericity" pour nommer leurs indices de compacité. Ce problème a été bien exposé par Teller (1976), qui a proposé de désigner les formes compactes (axe  $a \approx$  axe  $b \approx$  axe  $c$ ) par le terme d'*equant* (en anglais dans le texte) et qu'on peut traduire par « équidimensionnel ». Devant la limpidité et la

concision (seulement 550 mots en 2 pages) de la thèse développée par Teller, la communauté scientifique a, à la quasi-unanimité, adopté cette terminologie.

- La seconde ambiguïté est plus problématique car elle touche au fondement même du concept. Elle a pour creuset une certaine contradiction entre les premières définitions du terme et les formules de calculs proposées :
  - Les premières définitions proposées par Wadell (1932) et (Krumbein, 1941b) soulignaient que lorsqu'une particule est érodée et que ses angles s'émousent, sa géométrie tend vers celle d'une sphère. En cela la sphéricité se référerait selon Barrett (1980) à un descripteur de l'émoissé d'une particule.
  - Or, les formules de calcul des différents indices de sphéricité (Krumbein, 1941a; Pye et Pye, 1943; Aschenbrenner, 1956; Sneed et Folk, 1958) sont uniquement basées sur les trois axes (e.g.  $a$ ,  $b$  et  $c$ ) et se réfèrent donc selon Barrett (1980) à un descripteur de la forme d'une particule.

Pour Barrett (1980), la sphéricité n'est pas un descripteur de la seule forme mais inclut « a pinch » (une pincée, un brin) d'émoissé, ce qui en fait un paramètre conceptuellement difficile à traiter. De même Blott et Pye (2008) traitent la sphéricité comme un concept spécifique de description de la géométrie des particules.

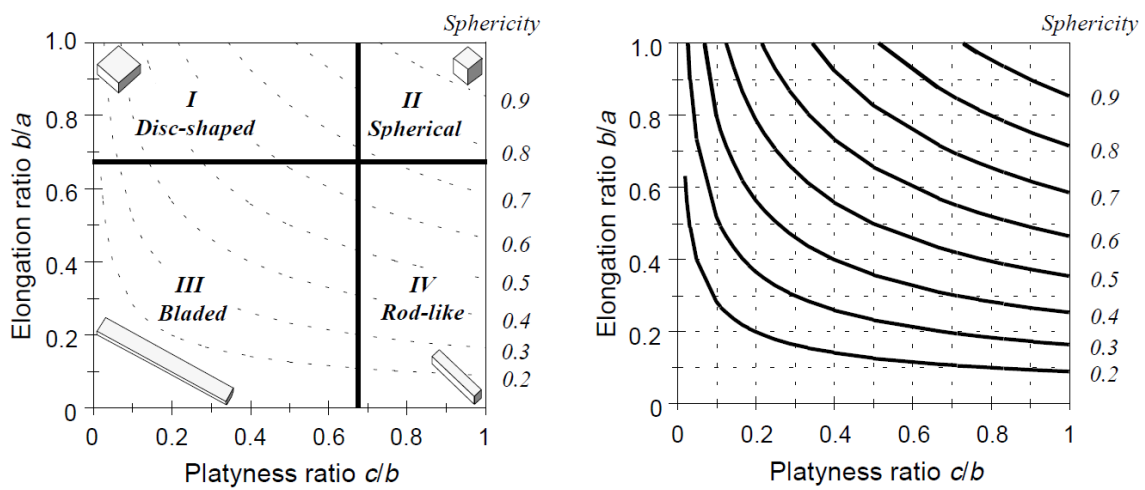
#### 1.2.2.2.2 *Classification et nomenclature des formes de particules*

La première de ces classifications Zingg (1935) a été basée sur les indices de forme en deux dimensions que constituent les rapports d'élongation (*elongation* =  $b/a$ ) et d'aplatissement (*flatness* =  $c/b$ ). La classification de Zingg permet de discriminer 4 grands types de forme (chacun composé de 2 sous-types), renommés selon une nomenclature anglo-saxonne par Krumbein et Pettijohn (1938): les disques (*disc-shaped particles*), les sphères (*spherical particles*, *equant* après Teller (1976)), les ellipses (*bladed particles*) et les tiges ou baguettes (*rod-like particles*).

Plus tard, Sneed et Folk (1958) ont proposé une nouvelle nomenclature, rediscutant le diagramme de Zingg qui présentent seulement 4 formes discriminées arbitrairement, par un seuil de 2/3 sur les indices d'aplatissement et d'élongation, inégalement réparties sur le champ de formes possibles. Sneed et Folk s'inspirent du diagramme triangulaire de Zingg, sur lequel ils représentent trois divisions (0.3, 0.5 et 0.7) du rapport  $S/L$  (e.g. le rapport des axes  $c/a$ ) sur le côté droit et deux divisions (0.33 et 0.67) du paramètre «  $F$  » tracées radialement depuis le

coin supérieur du triangle. Ils obtiennent ainsi 10 classes et 4 formes élémentaires : les formes compactes (*compact(C)*), lamellaires (*platy*), allongées (*elongate*) et elliptiques (*bladed*).

En 2008, Blott et Pye adaptent les diagrammes de Zingg et de Sneed et Folk, en représentant en 5 divisions d'étendues égales (e.g. 0.2) l'aplatissement et l'élongation sur les côtés gauche et droit respectivement (Figure 20). Ils proposent une nouvelle nomenclature structurée autour d'une dichotomie émoussé (*rounded*) vs non-émoussé (*non-rounded*) et comprenant chacune 8 classes (Figure 21 et Figure 22) : les plateaux (*plate*), les dalles (*slab*), les blocs plats (*flat block*), les blocs équidimensionnels (*equant block*), les blocs quasi-équidimensionnels (*sub-equant block*), les blocs allongés (*elongate block*), les baguettes ou tiges (*rod*) et les ellipses (*blade*).



**Figure 20. Diagrammes de forme de Zingg (1935) d'après Blott et Pye (2008) et avec l'indice de sphéricité de Krumbein (1941)**

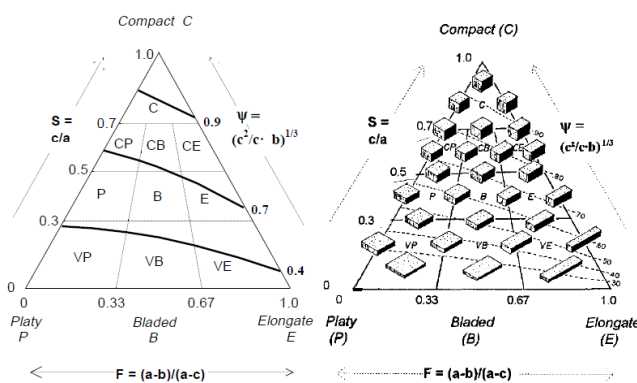


Fig. 2.23: (A) Sphericity-form diagram showing relation between particle shape and sphericity (Redrawn from Sneed and Folk (1958), by permission of the University of Chicago Press). (B) Form triangle with illustration of particle shapes using blocks of the appropriate axes ratios; all blocks have the same volume (Reprinted from Sneed and Folk (1958), by permission of the University of Chicago Press).

**Figure 21. Diagramme de forme de Sneed et Folk (1958), d'après Blott et Pye (2008).**

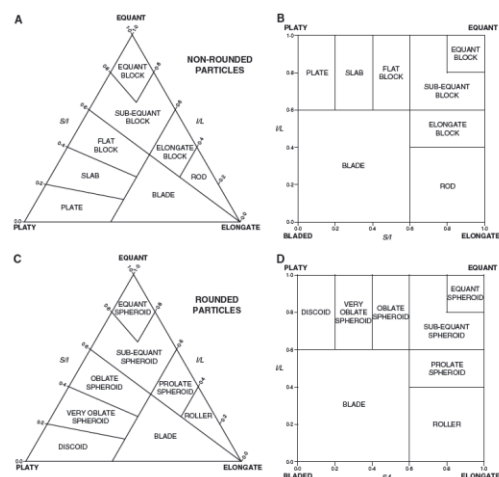
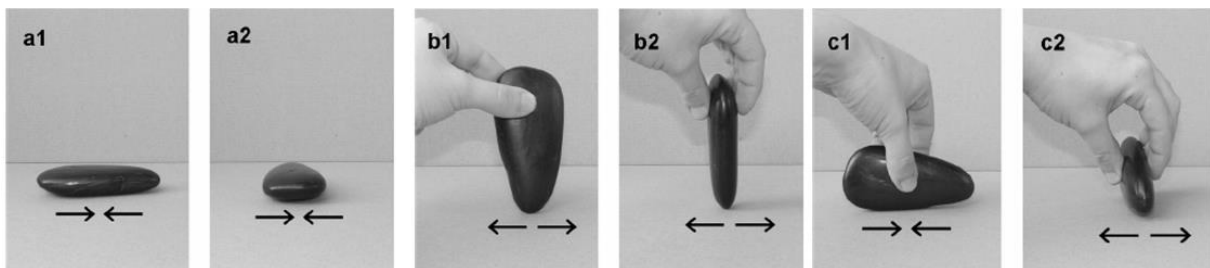


Fig. 11. Form terminology suggested in this paper, based on the degree of elongation and flatness, plotted on the Sneed and Folk and Zingg diagrams. Note that the terminology differs for non-rounded (A, B) and rounded (C, D) particles.

**Figure 22. Diagrammes de forme de Blott et Pye (2008) avec la dichotomie non-émoussé (A et B) et émoussé (C et D).**

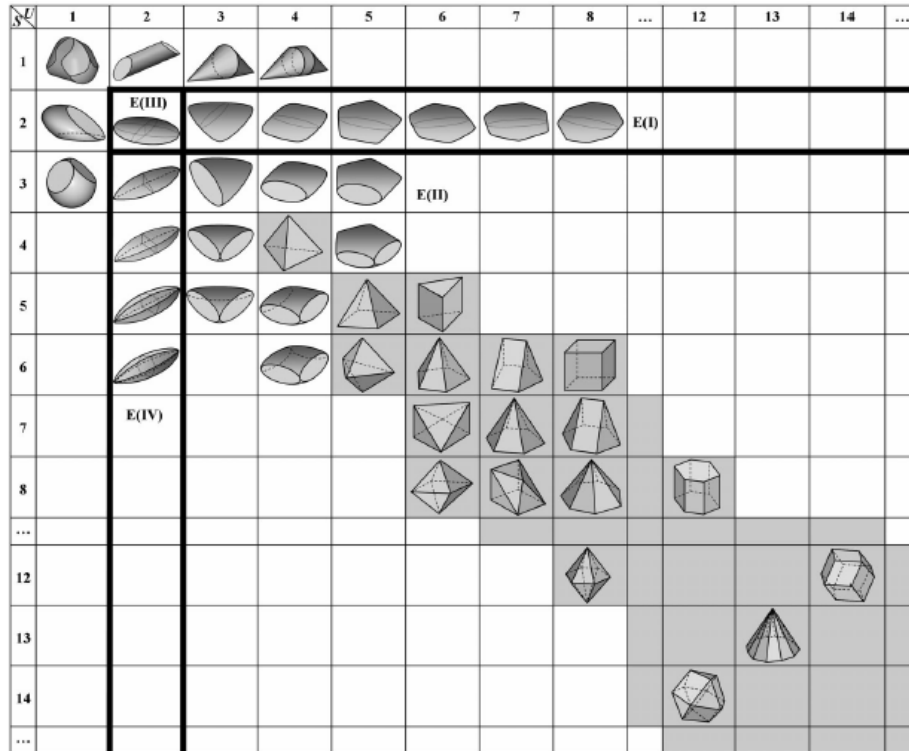
Plus récemment Domokos *et al.* (2009) ont proposé une classification (*e.g.* nommée *E-classification*) basée sur une approche mécanistique innovante qui consiste à compter le nombre de points d'équilibre d'une particule (Varkonyi et Domokos, 2006). Les points d'équilibre d'une particule peuvent être « facilement » et rapidement comptés avec de simples expériences manuelles pouvant être réalisées directement sur le terrain (Szabó et Domokos, 2010). Il n'y a que deux choix binaires à faire au regard des observations faites lors de ces expériences. Les auteurs distinguent les points (Figure 23):

- d'équilibre stables ou statiques (*nommés S*): Il s'agit de points où, sur une surface horizontale et lisse, une particule rigide, convexe et à la densité homogène, est stable et retrouve après de petites perturbations (Figure 23-a1 et -a2).
- d'équilibre instable : il s'agit de points d'équilibre sur surface horizontale lisse mais sur lesquels la particule ne revient pas après de petites perturbations. Ils sont de deux types nécessitant une certaine expertise pour les différencier (Szabó et Domokos, 2010) :
  - les points totalement instables (*unstable maxima*), qui ne sont stables sur aucun des deux plans orthogonaux définissant les 3 dimensions de l'espace (ils sont *nommés U*). La particule maintenue entre deux doigts en équilibre sur ces points peut basculer en avant en arrière, à droite ou à gauche, lorsqu'on la lâche (Figure 23-b1 et -b2);
  - les points en cols ou en selles (*saddles*), qui sont stables sur un des deux plans orthogonaux définissant les 3 dimensions de l'espace (ils sont *nommés H*). Maintenu entre deux doigts en équilibre sur ces points, la particule basculera soit frontalement (uniquement d'avant en arrière) soit latéralement (uniquement à droite ou à gauche) lorsqu'on la lâche, mais pas les deux (frontalement ET latéralement) sinon c'est un point totalement instable « U » (Figure 23-c1 et c2).



**Figure 23. Représentation des expérimentations pour l'identification des points d'équilibre par la méthode de Szabó et Domokos (2010).**

Szabó et Domokos (2010) se réfèrent au théorème de Poincaré-Hopf, qui établit que  $S+U-H=2$ , pour proposer une classification uniquement basée sur les valeurs de S et de H. Dans la théorie cette classification inclut une infinité de classe (ce qui est cohérent avec le continuum de forme proposé par Blott et Pye (2008)) mais en pratique seule une demi-douzaine a « un rôle important » (Szabó et Domokos (2010) ; Figure 24).



**Figure 24. Diagrammes des classes de forme de Domokos et al. (2009)**

### 1.2.2.2.3 Conclusion

Le foisonnement de classifications, de nomenclatures et d'indices pour caractériser la forme des particules illustre bien à la fois l'intérêt suscité par ces problématiques mais aussi les points de vue parfois divergents qui ont animé les débats au sein de la communauté scientifique. Ces points de vue ont pour racine des objectifs différents poursuivis par les chercheurs : définir l'influence de la forme sur la mobilité des particules, caractériser l'origine des formes par des processus érosifs ou encore déterminer des environnements de sédimentation et dépôt. Avec le recul, on comprend bien que mobilité, abrasion et dépôt sont fortement interdépendants et sujets à des effets de rétroaction (*e.g.* la mobilité influence l'abrasion qui, façonnant la forme et l'émoussé, influence le dépôt ainsi que la remobilisation des particules, donc sa mobilité).



### 1.2.2.3 L'émoussé en deux dimensions

La mesure de l'émoussé des particules sédimentaires représente un défi depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle (Blott et Pye, 2008). Tout comme la forme, l'émoussé peut être caractérisé par un grand nombre d'indices ou de chartes visuelles. Les premiers indices d'émoussés ont été développés dans le cadre d'échanges passionnés où les termes « formes » et « émoussés » souffraient d'un manque de distinction. Puis, le progrès de la technologie permet le développement de méthodes informatiques pour l'analyse d'image (Diepenbroek *et al.*, 1992; Bowman *et al.*, 2000; Drevin et Vincent, 2002; Drevin, 2007; Roussillon *et al.*, 2009; Montenegro Ríos *et al.*, 2013; Miller *et al.*, 2014; Takashimizu et Iiyoshi, 2016) et l'utilisation de scanners en trois dimensions (Hayakawa et Oguchi, 2005; Lin et Miller, 2005; Zhao et Wang, 2016). Cela a ouvert de nouvelles perspectives pour caractériser et réduire le biais opérateur (Bagheri *et al.*, 2015) et pour développer de nouveaux indices (Sukumaran et Ashmawy, 2001; Drevin et Vincent, 2002; Hayakawa et Oguchi, 2005; Lin et Miller, 2005; Bagheri *et al.*, 2015; Zhao et Wang, 2016).

#### 1.2.2.3.1 Les indices d'émoussé (2D)

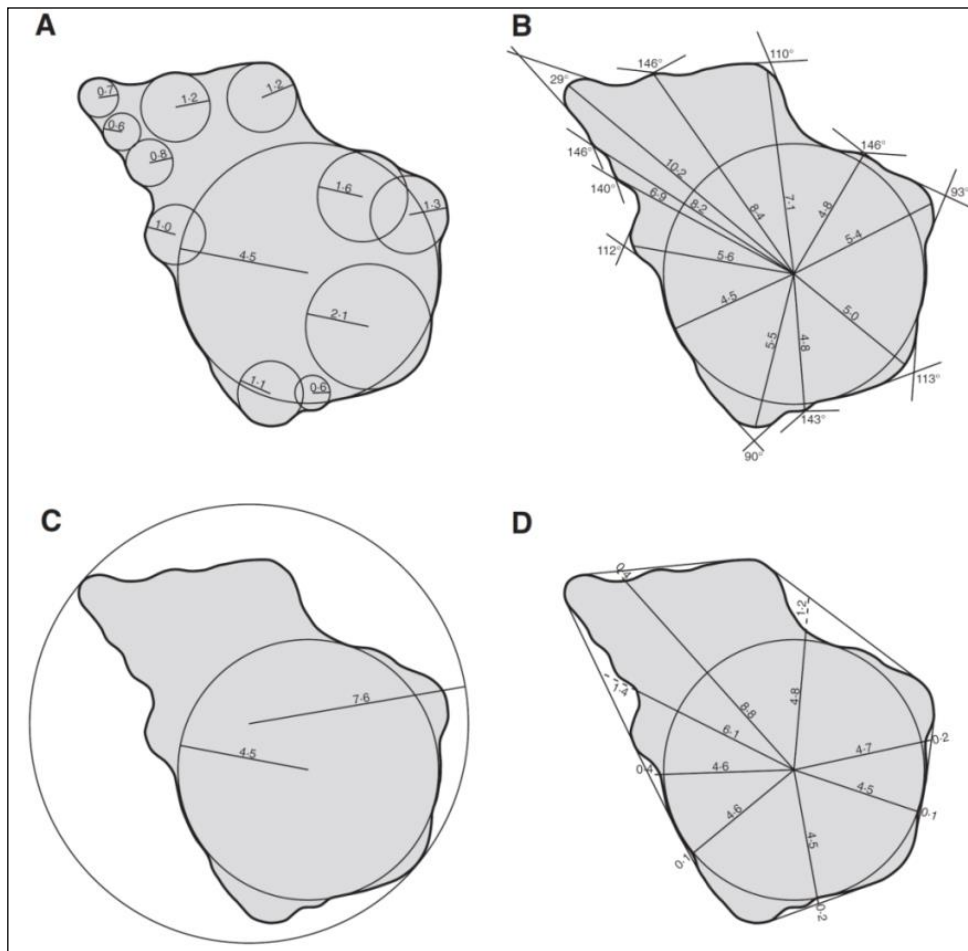
Pour des raisons pratiques, l'émoussé des particules a historiquement été établi à partir d'images en deux dimensions (2D) : des silhouettes du plan de projection maximale des particules définies par les axes  $a$  et  $b$  de ces dernières. Les premiers indices développés qu'on associe à l'émoussé mettent en relation le diamètre du rayon de courbure du sommet le plus anguleux de la particule à l'axe  $a$  (Wentworth, 1919) ou aux axes  $a$  et  $b$  (Wentworth, 1922a) de la particule. Mais ces premières formules produisent des valeurs quelque peu influencées par la forme des particules (*e.g.* les particules très allongées présentent de plus faibles valeurs d'émoussé que des particules équidimensionnelles aux sommets de même angularité). De plus, la mesure de l'angle d'un seul sommet n'est pas très représentative de l'émoussé de l'ensemble de la particule. Notons que cet indice sera repris et adapté par Cailleux (1947) qui le multipliera par 2000.

En 1932, Wadell propose un indice dont deux formules (l'une étant l'inverse de l'autre) sont basées sur l'ensemble des sommets des particules, que l'auteur définit comme « toute partie du contour de la particule dont le rayon de courbure est égal ou inférieur au rayon de courbure du plus grand cercle inscrit dans la particule » (Figure 25). Wadell (1932, 1933, 1935) suggère que l'émoussé est égal à la moyenne des rayons de courbure des sommets rapportée au rayon de courbure du plus grand cercle inscrit. L'intérêt de cette formule est que lorsque la particule atteint un degré maximal d'émoussé, le rayon de courbure

des sommets égale le rayon de courbure du plus grand cercle inscrit. L'inconvénient de cette méthode de mesure est qu'elle est très chronophage et biaisée par plusieurs ambiguïtés liées au nombre, à la localisation et à la taille des cercles inscrits aux sommets des particules (Wentworth, 1933; Blott et Pye, 2008).

Les critiques faites aux indices d'émoissé et de sphéricité ainsi que la difficulté technique d'effectuer les mesures nécessaires à leurs calculs sur des particules fines telles que les sables, favorisent le développement de chartes visuelles (Russell et Taylor, 1937; Krumbein, 1941a; Pettijohn, 1949; Powers, 1953; Krumbein et Sloss, 1951; Crofts, 1974). Elles présentent l'intérêt commun d'être simple d'utilisation, sans calcul mais elles restent sujettes à une certaine subjectivité et sont constituées de classes (Cf. section suivante).

Certains auteurs font le choix de ne pas renoncer au développement de nouveaux indices. Ainsi, Kuenen (1956), adoptant une approche orientée sur l'abrasion des particules et leur tendance à atteindre une forme sphérique (*cf.* Wadell, Krumbein), définit un indice d'émoissé qui est le rapport entre diamètre du rayon de courbure du sommet le plus anguleux et l'axe *b* de la particule (*e.g.* cet indice est égal à 1 pour une sphère). Cet indice souffre donc du même manque de représentativité, lié à la prise en compte d'un seul angle de la particule, que l'indice développée par Wentworth (1919, 1922a). Le travail de Kuenen (1956) servira par la suite de base au travail de Dobkins et Folk (1970) qui proposent un indice d'émoissé qui correspond au rapport entre le diamètre de courbure du sommet le plus anguleux et celui du plus grand cercle inscrit. Leur indice est donc assez similaire à celui de Kuenen (*e.g.* numérateurs similaires, dénominateurs proportionnels) et souffre par conséquent de la même limite (*e.g.* manque de représentativité). En 1964, Lees (1964b, 1964a) a proposé un nouvel indice baptisé "A" pour angularité. Son étude pointe du doigt le fait que certaines particules aux émoissés différents présentent cependant des indices de même valeur. Son indice combine l'angle formé par deux plans enchâssant une zone convexe de la particule et la distance entre le sommet de l'angle et le centre de la particule qu'il définit comme le centre du plus grand cercle inscrit (Figure 25). Même si la particularité du point de vue de Lees (*e.g.* problématiques d'ingénierie civile et d'infrastructure), par rapport à des auteurs comme Wentworth, Wadell ou Krumbein (*e.g.* processus d'abrasion en milieu alluviale), est assumée, l'indice proposé par Lees ne dépasse pas les limites de ses prédécesseurs : il est sujet à subjectivité, est très chronophage et est extrêmement influencé par la forme générale de la particule.

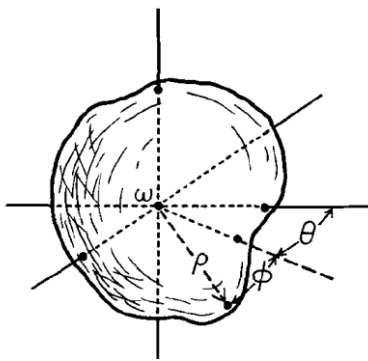


**Figure 25. Schémas illustratifs des méthodes de calculs des indices d'émoissé (Blott et Pye, 2008).**

**A: Wadell (1932); B: Lees (1934); C: Riley (1964); D: Blott et Pye (2008)**

À la fin des années 1970, une nouvelle approche émerge grâce au développement des premiers ordinateurs. Celle-ci propose l'utilisation d'une analyse de Fourier (Schwarcz et Shane, 1969; Ehrlich et Weinberg, 1970; Diepenbroek *et al.*, 1992) dont les principes sont posés par Schwarcz et Shane (1969) : les points de la ligne délimitant l'enveloppe de la particule sont établis en coordonnées polaires dont la référence est un point au « centre » de la particule (Figure 26). La transformée de Fourier du vecteur des valeurs associées aux rayons est calculée. Puis les valeurs des coefficients de cette transformée de Fourier servent pour l'analyse de la silhouette de la particule. La normalisation des coefficients permet de s'affranchir de la taille de la particule. Schwarcz et Shane (1969) ont perçu le potentiel de l'analyse de Fourier et ont proposé une méthode pour définir à quel degré la forme de la particule s'éloigne de la sphère. Mais ils n'en ont pas poussé plus loin le développement en soulignant le manque de définition précise du terme « émoissé », ainsi que la dépendance de leur méthode à la densité de point (la résolution) au niveau des sommets de particules. Diepenbrock *et al.* (1992) définissent que l'ellipse la mieux approximante est obtenue à partir du second coefficient de la transformée de Fourier et qu'un traitement approfondi des

coefficients constitue une méthode empirique pour soustraire les effets liés à la digitalisation et au bruit engendré par les pixels. Les auteurs définissent finalement un indice qui présente des coefficients de corrélation 0.94 et de 0.967, respectivement avec les 81 silhouettes avec les valeurs moyennes des neuf classes d'émoissés de la charte de Krumbein (1941a, 1941b). Toutefois, les méthodes impliquant la transformée de Fourier présentent une complexité qui rend les indices d'émoissé parfois difficiles à s'approprier et certains auteurs (Allen, 1989) leur reprochent le côté arbitraire du choix des harmonies (*e.g.* coefficient de transformée de Fourier).



**Figure 26. Représentation de la mesure des coordonnées polaires des points de l'enveloppe d'une particule.**



**Figure 27. Représentation de l'ouverture morphologique de la silhouette d'une particule dans Drevin (2002).**

En 2002, Drevin et Vincent proposent une autre approche dans laquelle les silhouettes des particules sont traitées par ouverture morphologique (*morphological opening*) (Figure 27). Ce traitement correspond à une dilatation puis une érosion de la silhouette de la particule par un élément structurant. Un cercle de rayon ( $r$ ) est déplacé de pixel en pixel de la bordure de la particule. Toute surface contenue dans le cercle est ajoutée à la silhouette : c'est la dilatation. Puis l'opération inverse est effectuée : c'est l'érosion. Le rayon  $r$  est empiriquement défini par les auteurs comme égal à  $0.42 \cdot l$  l'axe- $b$  de la particule. Cet indice de Drevin présente un coefficient de corrélation 0.96 et de 0.986, respectivement avec les 81 silhouettes et avec les valeurs moyennes des neuf classes d'émoissés de la charte de Krumbein (1941a, 1941b).

En 2008, Blott et Pye publient une synthèse des travaux traitant de l'émoissé des particules. Inexplicablement, les études basées sur l'analyse de Fourier et les travaux de Drevin ne sont pas mentionnés. Blott et Pye (2008) présentent un nouvel indice, qu'ils baptisent «  $I$  » pour « *Irragularity* », associé à une nouvelle classification (Figure 25). Devant la complexité et la subjectivité des mesures relatives aux angles, les auteurs proposent de

considérer les indentations (*concavities*) et saillies (*convexities*) des particules par rapport aux périmètres de leurs enveloppes convexes (*e.g.* l'enveloppe définie par une ligne connectant les sommets de la silhouette de plan de projection maximale par la plus courte distance).

En parallèle des travaux de Blott et Pye (2008), les nouvelles études relatives aux processus d'abrasion des particules considèrent les zones concaves et convexes des particules (Durian *et al.*, 2006, 2008; Domokos *et al.*, 2009; Roussillon *et al.*, 2009; Domokos et Gibbons, 2012; Szabó *et al.*, 2013). Ces réflexions s'inscrivent dans le prolongement des concepts proposés par Wadell (1932, 1933, 1935) et Krumbein selon lesquels les particules tendent vers une géométrie dont les angles et les sommets mais aussi les zones concaves ont disparu. Ces travaux aboutissent à l'élaboration d'indices de convexité en deux dimensions (Roussillon *et al.*, 2009; Miller *et al.*, 2014) et en trois dimensions (Domokos *et al.*, 2014; Miller *et al.*, 2014). Les indices de convexité en 2D correspondent à l'aire de la silhouette de la particule rapportée à l'aire de l'enveloppe convexe de la particule. Ceux en 3D à la surface des zones convexes rapportée à la surface totale de la particule.

On comprend, au regard des méthodes de calculs des indices de convexité, que ces derniers ne répondent pas exactement au critère formulé par Barrett (1980) concernant la définition de l'émoussé (*e.g.* en référer aux angles ou sommets de particules). Toutefois, on pourrait considérer les zones concaves comme les antagonistes des sommets et justifier ainsi leur prise en compte.

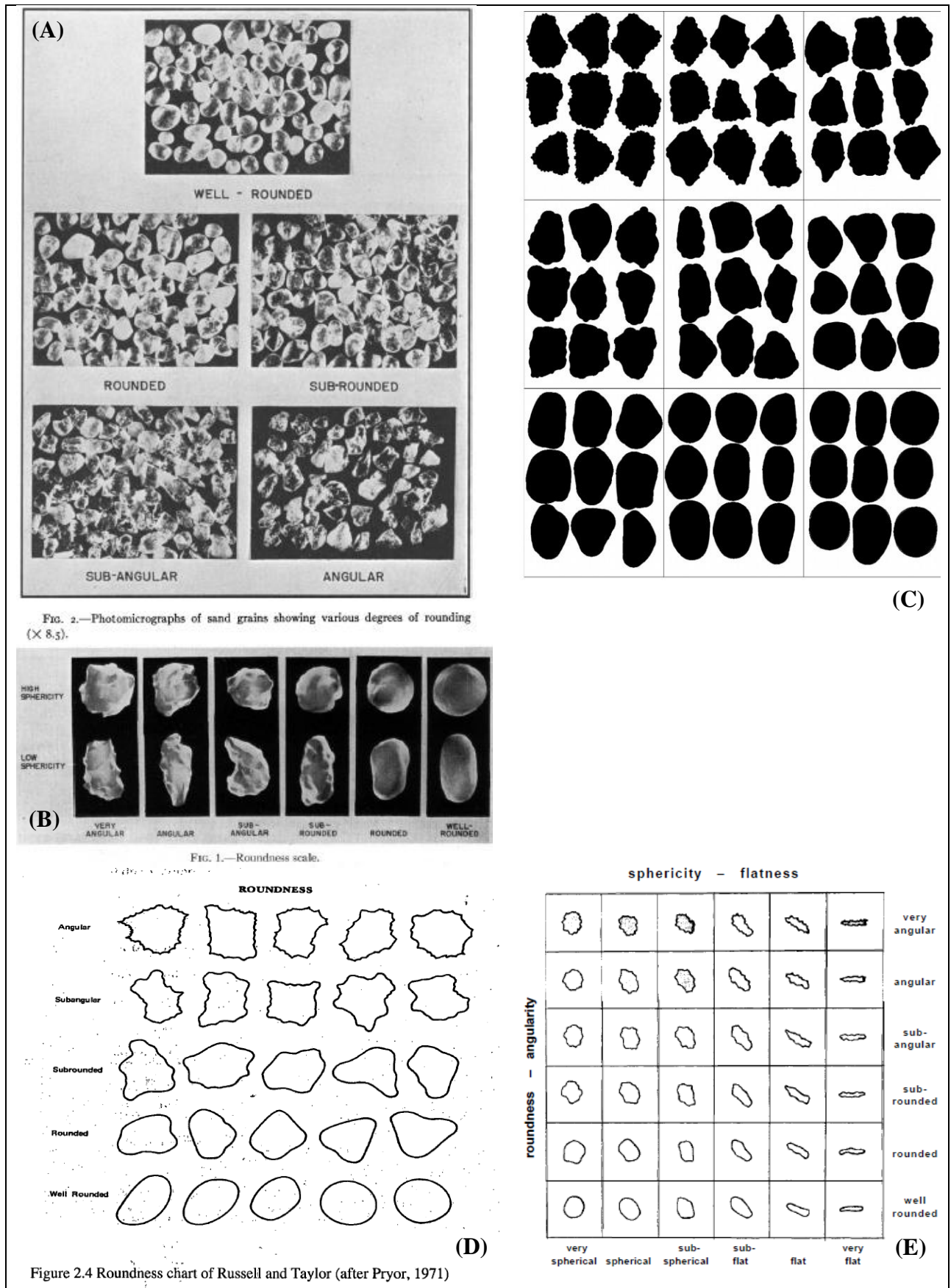
#### 1.2.2.3.2 Les chartes visuelles d'émoussé

Les chartes visuelles d'émoussé des particules sont composées de silhouettes de référence auxquelles on compare les particules étudiées et approfondissent le concept de particules modèles, proposé plus tôt (Mackie, 1897; Dunn, 1911; Blott et Pye, 2008). Ces chartes visuelles sont structurées autour de classes définies par une ou plusieurs particules types (Tableau 6). Russell et Taylor (1937) proposent une charte visuelle en 5 classes (*well-rounded, rounded, sub-rounded, sub-angular, angular*) d'émoussé composées de nombreux grains de sables photographiés au travers de l'objectif d'un microscope (Figure 28-A). Elle sera utilisée plus tard par Pryor (1971) qui formalise un abaque aux particules bien individualisées (Figure 28-B). La charte de Krumbein (1941) est sans doute la plus fameuse et la plus utilisée (Figure 28-C). Dans le cadre d'études de particules grossières (16-32 mm), Krumbein proposa une charte visuelle en neuf classes, chacune composée de 9 particules. Elle est toujours très utilisée comme étalon de validation des méthodes de calculs des indices développés de nos jours. Powers (1953) a proposé une charte visuelle (Figure 28-D) mêlant

forme (*high-* et *low-sphericity*) et émoussé (*very-angular, angular, sub-angular, sub-rounded, rounded, well-rounded*). En 1974, Crofts a réutilisé le concept de Powers pour proposer une charte visuelle sous l'aspect d'une matrice de 6 classes d'émoussé et 6 classes de forme, soit 36 silhouettes au total Figure 28-E).

<b>References</b>	<b>Parameters (Nb. of classes)</b>	<b>Nb. of particles per class (Nb. total of particles)</b>
Russell et Taylor (1937)	Roundness (5)	Uncountable (Uncountable)
(Krumbein, 1941a)	Roundness (9)	9 (81)
Powers (1953)	Roundness (6) Sphericity (2)	1 (12)
Crofts (1974)	Roundness (6) Sphericity (6)	1 (36)
Pryor (1971)	Roundness (5)	5 (25)

**Tableau 6. Description des paramètres et classes des chartes visuelles d'émoussé.**



### 1.2.2.3.3 Conclusion

La grande variété des indices d'émoissé (Tableau 7) est, comme celle des descripteurs de forme, liée à des divergences de points de vue adoptés dans différentes thématiques de recherche. Certains auteurs attachent une grande importance à une certaine exhaustivité de la métrique (*e.g.* considérer tous les angles). D'autres considèrent l'aspect pratique pour l'étude terrain comme primordiale (*e.g.* charte visuelle). D'autres encore choisissent un compromis entre le calcul d'indice continu mais dont les composantes sont faciles à mesurer sur le terrain (*e.g.* le sommet le plus anguleux + une autre métrique : axe-*a*, axe-*b*, etc...). Les nouveaux traitements numériques et photographiques ont pu intégrer ces différents objectifs (pratique terrain vs exhaustivité en laboratoire) alors que le développement des traitements 3D semble relancer une certaine divergence entre mesures en laboratoire et acquisitions *in situ*.

<b>Property:</b>	<b>Parameter or features</b>
<b>Forme (Shape/Form)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b><i>Elongation &amp; Flatness</i></b> : Wentworth (1922a), Zingg (1935), Dobkins et Folk (1970), Illenberger (1991)</li> <li>- <b><i>Sphericity</i></b> : Cox (1927), Tickell (1931), Wadell (1932, 1933, 1935), Krumbein (1941a, 1941b), Pye et Pye (1943), Corey (1949), Folk (1955), Aschenbrenner (1956), Sneed et Folk (1958), Janoo (1998)</li> <li>- <b><i>Form ratio</i></b> : Corey (1949), Sneed et Folk (1958), Janke (1966), Illenberger (1991)</li> <li>- <b><i>Factor « F »</i></b> : Aschenbrenner (1956), Williams (1965)</li> <li>- <b><i>Equilibrium points</i></b>: Domokos <i>et al.</i> (2009), Szabó et Domokos (2010), Szabó <i>et al.</i> (2013)</li> </ul>
<b>Emoussé (Roundness)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b><i>Of the sharpest corner</i></b> : Wentworth (1919, 1922b), Riley (1941), Cailleux (1947), Kuenen (1956), Dobkins et Folk (1970)</li> <li>- <b><i>Average roundness of corners</i></b> : Wadell (1932), Roussillon <i>et al.</i> (2009)</li> <li>- <b><i>Average angularity of corners</i></b> : Lees (1964a, 1964b)</li> <li>- <b><i>Average roundness from convexity of outline</i></b> : Sukumaran et Ashmawy (2001), Roussillon <i>et al.</i> (2009), Blott et Pye (2008), Miller <i>et al.</i> (2014)</li> <li>- <b><i>Fourier transformation</i></b> :Schwarcz et Shane (1969), Ehrlich et Weinberg (1970), Diepenbroek <i>et al.</i> (1992)</li> <li>- <b><i>Morphological opening</i></b> : Drevin et Vincent (2002), Roussillon <i>et al.</i> (2009)</li> <li>- <b><i>3D</i></b>: Hayakawa et Oguchi (2005), Lin et Miller (2005), Bagheri <i>et al.</i> (2015), Zhao et Wang 2016)</li> <li>- <b><i>Visual charts</i></b> : Russell et Taylor (1937), Krumbein (1941a), Powers (1953), Pryor (1971), Crofts (1974)</li> </ul>
<b>Surface Texture</b>	Krinsley et Donahue (1968), Dowdeswell (1982), Beddow (1988), Bowman <i>et al.</i> (2000)

**Tableau 7. Indices de forme, d'émoissé et de texture de surface communément utilisés.**

Parmi cette diversité d'indices et de chartes, la charte visuelle de Krumbein (1941a) est devenue un étalon dont de nombreux auteurs contemporains se servent pour valider la performance et l'intérêt de leurs nouveaux indices. L'indice de Wadell (1932), l'autre référence en terme d'émoissé, suscite le développement de nombreux algorithmes ces dernières années. En effet, il existe un certain nombre de contributions, qu'on ne trouve pas



nécessairement dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture mais sur des plateformes comme *ResearchGate*, et qui tentent de relever ce challenge en proposant des méthodes de calcul automatisée (rapides, objectives et reproductibles).

Enfin, on peut se poser la question de l'intérêt du développement de nouveaux indices (aussi corrélés soient-ils avec les silhouettes la charte de Krumbein (1941a)) lorsque ceux-ci ne sortent pas du cadre théorique de leur développement et ne sont pas confrontés à des réalités de terrain. Même si, d'un point de vue constructif, il faut souligner qu'il existe une complémentarité certaine entre ces indices, d'un point de vue opérationnel, il n'est pas possible de tous les établir lorsqu'on souhaite répondre à des problématiques concrètes liées aux fonctionnements des systèmes fluviaux.

### **1.2.3 La toolbox de Roussillon *et al.* (2009)**

Roussillon *et al.* (2009) ont proposé un algorithme, un couple de fichiers ".exe" fonctionnant avec l'invite de commande *CMD* de Windows, qui calcule une série d'indices de forme et d'éroulé en deux dimensions de particules sédimentaires grossières photographiées sur une plaque rouge d'un mètre carré. C'est un outil qui permet de faciliter la collecte sur le terrain d'un grand volume de données. Développé au sein du laboratoire Environnement Ville et Société de l'UMR 5600 du CNRS en 2006 (Roussillon, 2006), il n'a fait l'objet d'une publication qu'en 2009 mais sa diffusion est restée très confidentielle, ce qui n'a pas permis une utilisation à la mesure de son potentiel. L'outil fonctionne en deux étapes :

- (1) la segmentation des photographies ;
- (2) les calculs des descripteurs à proprement parler.

Lors de la première étape, l'algorithme détermine, en fonction d'une valeur-seuil d'intensité sur le canal rouge de la photographie, si un pixel appartient à la silhouette d'une particule sédimentaire ou alors au fond rouge. Il produit alors 3 résultats intermédiaires :

- (1) une version binaire (*e.g* en noir et blanc) de l'image originale ;
- (2) une copie de la version originale sur laquelle sont dessinés les contours et indiqués les numéros des galets segmentés ;
- (3) et un fichier numérique au format ".txt" compilant des paramètres bruts qui seront utilisés lors de la seconde étape pour calculer les indices d'éroulé et de forme.

Lors de la seconde étape, l'algorithme calcule pour chaque galet identifié les indices d'éroulé et de forme listés dans le Tableau 8 et compile les résultats dans un tableau au format ".txt" qu'on peut importer dans un logiciel statistique.

Descripteurs	Formules de calculs
Elongation	$e = \frac{l}{L}$ <p>Where: <math>l</math> is a-axis length et <math>L</math> is b-axis length.</p>
Compacity	$comp = \frac{P_F^2}{A_F}$ <p>Where: <math>P_F</math> is the particle perimeter et <math>A_F</math> is the particle area.</p>
Circularity	$circ = \frac{P_F}{2\sqrt{A_F\pi}}$ <p>Where: <math>P_F</math> is the particle perimeter et <math>A_F</math> is the particle area.</p>
Convexity (perimeter ratio)	$conv1 = \frac{P_{env.conv}}{P_F}$ <p>Where: <math>P_{env.conv}</math> is the convex hull perimeter et <math>P_F</math> is the particle perimeter.</p>
Convexity (areas ratio)	$conv2 = \frac{A_F}{A_{env.conv}}$ <p>Where: <math>A_{env.conv}</math> is the convex hull Area et <math>A_F</math> is the particle area.</p>
Wadell	$rW = \frac{1}{k.R} \sum_{i=1}^k r_i$ <p>Where: <math>R</math> is radius of the largest inscribed circle et <math>r</math> the radius of circle smaller than <math>R</math> is the particle area.</p>
Cailleux	$rC = \frac{r_{min}}{l}$ <p>Where: <math>r_{min}</math> is radius of the smallest inscribed circle et <math>l</math> is a-axis length.</p>
Drevin	$rD = \frac{A_{S \oplus C(0,r_c) \ominus C(0,r_c)}}{A_S}$ <p>Where: <math>A_{S \oplus C(0,r_c) \ominus C(0,r_c)}</math> is particle area after the morphological opening with a circular structuring element <math>C</math> of center <math>0</math> et radius <math>r_c</math>. Operators <math>\oplus</math> et <math>\ominus</math> denote the Minkowski's addition (dilatation or thresholding in the distance transform of the complementary set of the silhouette) et Minkowski's subtraction (erosion or thresholding in the distance transform of the complementary set of the silhouette).</p>
$P_g/P_e$	$rP = \frac{P_g}{P_e}$ <p>Where: <math>P_g</math> is the perimeter of the particles et <math>P_e</math> the perimeter of the best approximating ellipse.</p>

**Tableau 8. Descripteurs de forme et d'émoussé des particules sédimentaires calculés la Toolbox l'algorithme de Roussillon *et al.* (2009).**

#### **1.2.4 Synthèse sur la caractérisation des particules sédimentaires**

La charge sédimentaire est composée d'innombrables particules que les scientifiques définissent notamment au travers de leur taille, leur forme et leur émoussé. Bien qu'il existe d'autres caractéristiques, comme la lithologie ou la densité, et que leurs intérêts respectifs en géomorphologie fluviale (*e.g.* dans les régions à la géologie contrastée, la lithologie permet de déterminer et localiser les sources sédimentaires et de comprendre le fonctionnement du système alluvial à l'échelle du bassin versant (Lindsey *et al.*, 2007)) ou dans l'étude du transport solide (*e.g.* la densité est utilisée dans les équations du transport solide), nous considérerons que :

- La lithologie, si dissociée de la densité et de la résistance à l'abrasion, est peu influente sur la mobilité des particules. Comme le présent travail n'apporte pas d'éléments nouveaux concernant sa détermination, elle ne sera abordée que comme un facteur de sensibilité des particules à l'abrasion;
- La densité est déjà bien étudiée en mécanique des fluides et des matériaux. Son rôle est largement documenté dans la bibliographie. Là encore ce travail ne contient pas d'éléments nouveaux en ce qui concerne sa détermination. Toutefois, son influence sur la mobilité des particules ne sera pas négligée, loin de là, puisque ce travail présentera une analyse comparative des influences respectives de la forme et de la densité sur la mobilité des particules. En effet, généralement considérée comme stable aux échelles d'investigation dans les systèmes fluviaux, la densité est associée à la taille des sédiments pour déterminer les seuils de mise en mouvements des particules sédimentaires au travers des équations dites du transport solide. Son influence sur la mobilité des particules sera donc appréhendée en comparant celle résultant de la forme des particules.

### 1.3 LE TRANSPORT SOLIDE ET MOBILITÉ DES PARTICULES

Nous avons vu que le transport solide, avec le débit liquide, contrôle le fonctionnement du système fluvial et explique bien souvent la diversité des paysages rencontrés dans les cours d'eau en façonnant les macroformes alluviales, les lits des cours d'eau et les particules sédimentaires. Il contribue en outre au bon fonctionnement écologique des cours d'eau et influence l'organisation spatiale des habitats aquatiques (Dorava *et al.*, 2001). L'étude du transport solide constitue donc un enjeu majeur pour la connaissance du fonctionnement et la bonne gestion des cours d'eau.

Dans ce contexte les objectifs de la communauté scientifique sont de :

- quantifier les flux de sédiments (*e.g.* des vitesses de transfert et des volumes de sédiments) qui transitent dans le système fluvial ;
- déterminer les processus qui contrôlent ces flux de sédiments ;
- comprendre comment les propriétés des particules sédimentaires influencent leur mobilité ;
- déterminer comment le transport transforme les particules sédimentaires au cours de leur voyage ;

Ces objectifs ont été établis pour répondre à des besoins aussi divers que :

- définir l'état hydrosédimentaire de cours d'eau et l'espace de bon fonctionnement nécessaire à sa préservation ;
- comprendre les ajustements observés ou à venir, dans des cours d'eau anthropisés et déconnectés de tout ou partie de leurs sources sédimentaires ;
- adapter les modes de gestion des ouvrages, tels que les barrages réservoirs, perturbant le transit naturel des flux d'eau et de sédiment ;
- assurer des flux minimaux nécessaires au maintien des habitats sur lesquels se développent les écosystèmes des zones rivulaires, hyporhéiques et aquatiques ;
- ou encore déterminer et calibrer les actions de restauration des cours d'eau visés par de telles opérations ;

Dans cette partie, ce travail décrira succinctement d'où provient la charge sédimentaire et comment elle parvient dans le système fluvial (*e.g.* l'origine des matériaux constituant les flux de sédiments). Puis, il présentera les différents modes de transports des particules sédimentaires (*e.g.* les différents flux de sédiments). Il traitera ensuite des différentes phases du transport des particules sédimentaires grossières. Après quoi, je tâcherai

d'exposer les caractéristiques des particules sédimentaires grossières et pointerai celles qui influencent leur mobilité par charriage (*e.g.* l'influence des caractéristiques des particules sur le flux). Enfin, j'aborderai les processus par lesquels les particules sont transformées au cours de leur transport (*e.g.* comment les flux transforment les particules).

### **1.3.1 Les Origines de la charge sédimentaire**

L'étude des origines de la charge sédimentaire est importante en géomorphologie fluviale car, en fonction de la pétrographie (structure, minéralogie, chimie) de la roche mère dont ils sont issus, ainsi que des processus qui ont concouru à leur transfert depuis leur source jusqu'au cours d'eau, les sédiments présentent au moment de leur entrée dans le système fluvial des caractéristiques géométriques spécifiques (*e.g.* taille, forme, émoussé).

#### **1.3.1.1 Les apports externes**

Les apports dits "externes" regroupent tous les apports fournis au système fluvial étudié et on distingue généralement en fonction de leurs origines (Malavoi *et al.*, 2011) les apports primaires et les apports secondaires.

Les *apports externes* issus d'une *production primaire* ont pour origine l'érosion de la roche mère ou de dépôts de matériaux meubles de versants (tablier d'éboulis, moraines, colluvions, etc...). Ces processus se retrouvent généralement dans la *zone de production* au sein du *système fluvial* de Schumm (1977), où les versants présentent des valeurs de pente très fortes. Les sédiments arrivent dans le lit du cours d'eau par l'intermédiaire de *processus gravitaires* plus ou moins complexes pouvant se relayer dans l'espace et le temps: les sédiments sont pris en charge par une chaîne de processus successifs jusqu'à atteindre le lit du cours d'eau (Bridge et Demicco, 2008; Sklar *et al.*, 2017). L'activité et l'intensité de ces processus sont gouvernées par deux processus naturels en compétition: l'orogénèse ou soulèvement des montagnes (*rock uplift*) et l'érosion. En dehors, des environnements glaciaires, les cours d'eau représentent le principal agent d'érosion et contrôlent en partie ces processus de versants à des échelles temporelles pluriséculaires (Burbank *et al.*, 1996). Parmi ces processus d'apports externes de production primaire, on retrouve :

- Les écroulements directs, les tabliers d'éboulis ou les couloirs d'avalanche. L'érosion de la roche mère (par des processus mécaniques comme les cycles de gel-dégel ou par des processus chimiques, comme la dissolution, qui entraînent l'élargissement de fissures dans la roche) produit des débris qui arrivent directement dans le système

fluvial: falaise surplombant le lit ou bien traversée de gorges; ou qui sont pris en charge par un processus relais comme les tabliers d'éboulis ou les avalanches.

- La solifluxion et la reptation. Ces processus relais, qui se rencontrent généralement le long de versant très raides, provoquent le déplacement lent (< 10 cm/an) des particules sédimentaires au sein d'une couche superficielle (quelques dizaines de centimètres) constituée d'une matrice fine et dans laquelle peuvent se trouver des particules grossières exhumées par des déracinements d'arbres ou le ravinement.
- Les glissements de terrain.

L'efficacité de ces processus régissant les apports sédimentaires externes est étroitement liée à la connexion de ces formes de transport avec le lit du cours d'eau. L'activité de ces processus est soumise aux effets :

- du climat et de ses changements, qui influencent le développement de la végétation, les cycles de gel-dégel, le régime et l'intensité des précipitations, etc...(Riebe *et al.*, 2015),
- de changements d'occupation des sols comme la diminution de l'activité pastorale n'inhibant plus le développement de la végétation par surpâturage (Liébault *et al.*, 2005),
- et, en France, de la politique de la Restauration des Terrains de Montagnes (Liébault *et al.*, 2005, 2013) qui a poussé à la réalisation de divers travaux de stabilisation des versants à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Les *apports externes primaires* n'ont pas encore subi de transformation par les processus d'érosion observés pendant le transport solide. De taille variable, ils se caractérisent généralement par des particules dont l'angularité est marquée.

Les *apports externes secondaires* sont injectés dans le lit par les affluents du système fluvial investigué. Ils ont donc, au contraire des *apports externes primaires*, subi une abrasion partielle liée au transport solide en milieu fluvial.

### **1.3.1.2 Les apports internes**

Les apports dits "*internes*" sont issus d'un stock interne de sédiments alluviaux produit par le système fluvial lui-même. On distingue deux types d'apports internes:

- Le stock disponible dans le lit mineur qui transite vers l'aval. Ce stock est constitué par les macroformes alluviales (c'est-à-dire des formes d'accumulation temporaires telles que les bancs de galets exondés, nappes de charriage, dunes, etc...) et par le fond du lit

(si celui-ci n'est pas figé par un pavage constitué de blocs sédimentaires tellement gros qu'ils ne sont pas mobilisés lors des crues les plus fréquentes et forment une couche de protection, une barrière empêchant la mobilisation de particules plus petites qui constituent une sous-couche).

- Le stock disponible dans le lit majeur et les terrasses, et qui est progressivement injecté dans le cours d'eau par érosion latérale ou par recoupement de méandres. Ce dernier processus peut provoquer l'injection d'un grand volume de matériaux dans un laps de temps relativement court (Constantine *et al.*, 2014).

### **1.3.2 Les modes de déplacement de la charge sédimentaire**

Il existe trois modes de déplacement des particules sédimentaires. (1) La suspension, qu'on oppose souvent au (2) charriage, et un processus considéré comme intermédiaire aux deux précédents: (3) la saltation.

La *suspension* concerne des particules sédimentaires suffisamment fines (*e.g.* < 0.1 mm) pour que les turbulences du fluide suffisent à compenser leur masse. Ces particules (*wash material*), maintenues au sein de la masse d'eau, se déplacent dans la veine fluide et peuvent parcourir une fois mobilisées, une grande distance (> centaines de mètres) avant de se déposer.

La *saltation* que certains auteurs associent au charriage, concerne des particules qui alternent des phases de suspension, de rebonds et de roulage sur le fond du lit (ou sur les autres particules). Ce mode de déplacement concerne classiquement les particules sableuses bien que celles-ci puissent aussi se déplacer par charriage selon les conditions d'écoulement.

Le charriage (*bedload*) est parfois aussi appelé "charriage vrai" par les auteurs associant la saltation au charriage. Le *charriage vrai*, concerne des particules grossières qui constituent la charge de fond (*bedload material*) et que le fluide ne peut aucunement maintenir en suspension. La charge de fond se déplace par roulage ou par glissement sur le fond du lit ou sur d'autres particules sédimentaires mobiles ou non. Ce mode de déplacement concerne principalement les particules grossières (*e.g.* < 2 mm).

### **1.3.3 Les phases du transport solide par charriage**

On distingue trois phases de mobilité des particules sédimentaires (Einstein, 1937; Hjølström, 1935 ; Figure 29):

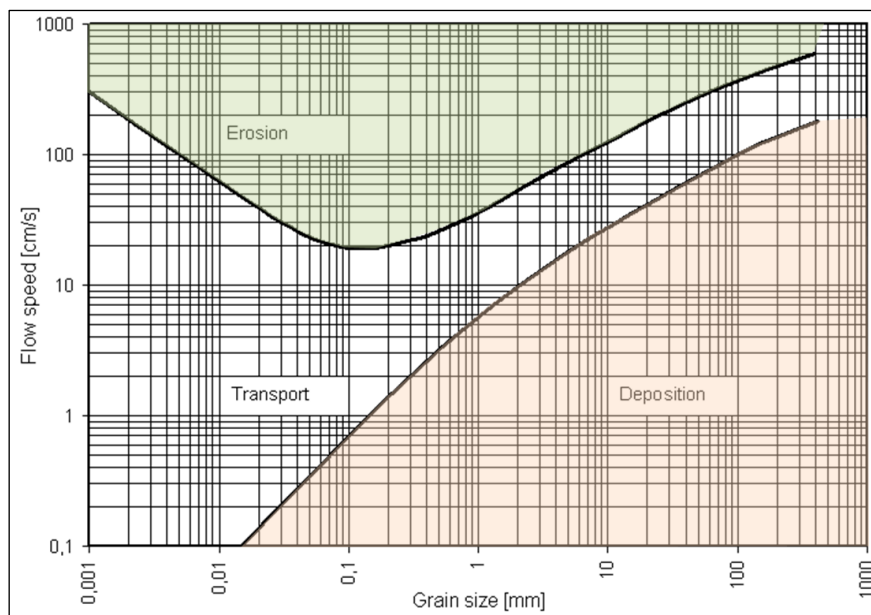
- **L'entraînement** s'opère lorsque les forces exercées par le fluide sur la particule, regroupées sous les termes de *contrainte tractrice* ou de cisaillement au fond (*bed shear stress*), atteignent un seuil ou une valeur critique (*critical bed shear stress*) qui excèdent les forces de stabilisation. Les principales forces de stabilisation des particules au sein d'un lit sont la gravité terrestre, la pression de l'eau et le contact avec les particules environnantes. Nous verrons dans une partie à venir que d'autres facteurs y concourent.
- **Le déplacement** est un phénomène extrêmement stochastique quel que soient les échelles spatiotemporelles considérées (Einstein, 1937; Ergenzinger et Schmidt, 1990; Hassan *et al.*, 1991; Schmidt et Ergenzinger, 1992a; Bridge et Bennett, 1992; Chacho *et al.*, 1994; Liedermann *et al.*, 2013). Il est fruit de variations spatiales des conditions d'écoulement notamment liées à la géométrie du lit et à la présence de macroformes, d'obstacles, mais aussi de complexes interactions entre particules mobiles et non-mobiles.
- **Le dépôt** correspond au moment où la particule s'arrête totalement pour un temps plus ou moins long. Il se produit lorsque les forces de frottement qui s'appliquent sur la particule sédimentaire excèdent les forces d'entraînement exercées par le fluide et l'énergie cinétique (*e.g.*  $ES = \frac{1}{2} * \text{masse} * \text{Vitesse au carrée}$ ) propre à la particule liée à sa vitesse de déplacement et à sa masse. Le dépôt peut donc se produire durant la crue à la faveur de conditions locales de ralentissement de l'écoulement. Lorsque la décrue s'amorce, la contrainte tractrice diminue, non seulement localement mais globalement, à l'échelle de toute une section ou d'un tronçon homogène. Le dépôt, jusque-là localisé et/ou temporaire, se généralise et s'accroît : les temps d'arrêt des particules sédimentaires deviennent alors de plus en plus longs et concernent des fractions granulométriques de moins en moins grossières. La fraction fine (*wash material*), quant à elle, reste mobile. Le dépôt est donc un phénomène relativement progressif, à la fois spatialisé (*e.g.* avec des zones de dépôt préférentiel : les macroformes) et potentiellement avec effets de seuil similaires à l'entraînement. Le dépôt donne au paysage fluvial un aspect mosaïqué, qu'il gardera jusqu'à la crue morphogène suivante, par la construction des macroformes sédimentaires (*e.g.* les bancs, les nappes de charriage, les dunes).

Au cours d'une crue, l'entraînement, le déplacement et le dépôt des particules grossières coexistent au sein d'un même tronçon d'étude et confèrent au transport solide une



variabilité spatiotemporelle très particulière (Habersack, 2001; Laronne *et al.*, 2003; Vericat *et al.*, 2006; Rennie et Church, 2010; Francalanci *et al.*, 2013; Habersack *et al.*, 2016). Cette variabilité est fonction de :

- la morphologie en trois dimensions du lit du cours d'eau (pente, profondeur, largeur et sinuosité) qui conditionne les écoulements et donc les forces d'entraînement ;
- de la forme de l'hydrogramme de crue (*e.g.* les valeurs de débit ou de hauteur d'eau successivement atteintes au cours du temps).



**Figure 29. Diagramme de Hjulströms (1935).**

#### **1.3.4 Détermination, mesures et modélisation du charriage**

Devant la complexité du phénomène, l'étude du transport solide repose sur plusieurs axes :

- simplifier le phénomène afin de le quantifier à l'échelle du système fluvial ou du tronçon d'étude.
- Analyser finement à l'échelle d'une particule élémentaire les phases de son transport et déterminer les facteurs, notamment les propriétés de la particule, qui contraignent ces phases dans le but d'expliquer la variabilité des valeurs de flux observées.

L'objectif premier reste le même : caractériser le flux sédimentaire (*e.g.* le débit solide). Il s'agit de déterminer un volume, une temporalité et une composition granulométrique du flux à l'échelle de tronçons homogènes (si possible d'analyser ce qui se passe aux interfaces entre tronçons) puis de déterminer des indicateurs simples pour l'estimer, notamment par l'intermédiaire de la relation entre l'hydrogramme de crue et le flux sédimentaire.

Un préalable commun à ces deux approches est l'identification du seuil de mise en mouvement, c'est-à-dire la valeur de contrainte tractrice au-delà de laquelle les particules sont mobiles. Celle-ci est nécessaire pour :

- la détermination des taux de transport, de la fréquence et de la durée des crues morphogènes pour l'estimation des flux sédimentaires ;
- l'analyse comparative de la mobilité des particules aux propriétés différentes.

#### 1.3.4.1 Mise en mouvement et détermination du moment du transport solide

Pour ce faire, on utilise la force tractrice, notée  $\tau$  et exprimée en Newton par mètre carré ( $\text{N.m}^{-2}$ ), qui exprime la force exercée par l'écoulement du fluide sur le fond du lit. Elle est établie localement à partir de la pente, de la hauteur d'eau ou du rayon hydraulique ( $R_h = S/P$  avec  $S$  = surface de la section mouillée et  $P$  le périmètre de la section mouillée).

$$\tau = g \rho R_h J$$

Où :

- $g$  = accélération de la pesanteur en  $\text{m.s}^{-2}$
- $\rho$  = masse volumique du fluide en  $\text{N.m}^{-3}$  (e.g. la densité)
- $R_h$  = le rayon hydraulique de la section en  $\text{m}^2$
- $J$  = pente en  $\text{m.m}^{-1}$
- $\tau$  = contrainte tractrice en  $\text{N.m}^{-2}$

La force tractrice est ensuite rapportée aux particules du lit pour déterminer si elle peut les mobiliser. Pour cela, on utilise le paramètre de Shields noté  $\tau^*$ . Ce paramètre, déterminé expérimentalement par Shields (1936), est fonction des caractéristiques de la particule sédimentaire (taille  $\approx$  volume + densité  $\approx$  masse).

$$\tau^* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D} \approx \frac{R_h J}{1.65D}$$

Où :

- $g$  = accélération de la pesanteur en  $\text{m.s}^{-2}$
- $D$  = diamètre (axe  $b$ ) de la particule
- $\rho_s$  = masse volumique de la particule en  $\text{N.m}^{-3}$  (e.g. la densité)
- $\rho$  = masse volumique du fluide en  $\text{N.m}^{-3}$  (e.g. la densité)
- $R_h$  = le rayon hydraulique de la section en  $\text{m}^2$
- $J$  = pente en  $\text{m.m}^{-1}$
- $\tau^*$  = contrainte adimensionnelle de Shields

Selon Shields, l'entraînement s'opère lorsque la force tractrice adimensionnelle dépasse un seuil critique :  $\tau^* > \tau^*c$ . Alors qu'il n'existe pas de consensus au sein de la

communauté scientifique (Malavoi *et al.*, 2011), des valeurs de  $\tau^*c$  comprise entre 0.03 et 0.06 ont été proposées depuis les travaux de Shields (1936) et il semble que pour les rivières à charges grossières la valeur de 0.045 est la mieux adaptée (Komar, 1987; Knighton, 1998; Robert, 2003; Recking *et al.*, 2009). La contrainte adimensionnelle ( $\tau^*$ ) et la contrainte adimensionnelle critique ( $\tau^*c$ ) permettent de déterminer, pour un tronçon d'étude ou pour un système fluvial homogène donné, pour quelle hauteur d'eau et donc pour quel débit, il y a charriage. Identifiées sur le pic de crue dessiné par l'hydrogramme, ces deux valeurs permettent d'estimer à quel moment débute et s'arrête le charriage. Toutefois, ces valeurs nécessitent d'être confirmées empiriquement sur le terrain ou en canal expérimental.

#### 1.3.4.2 Caractérisation du flux sédimentaire

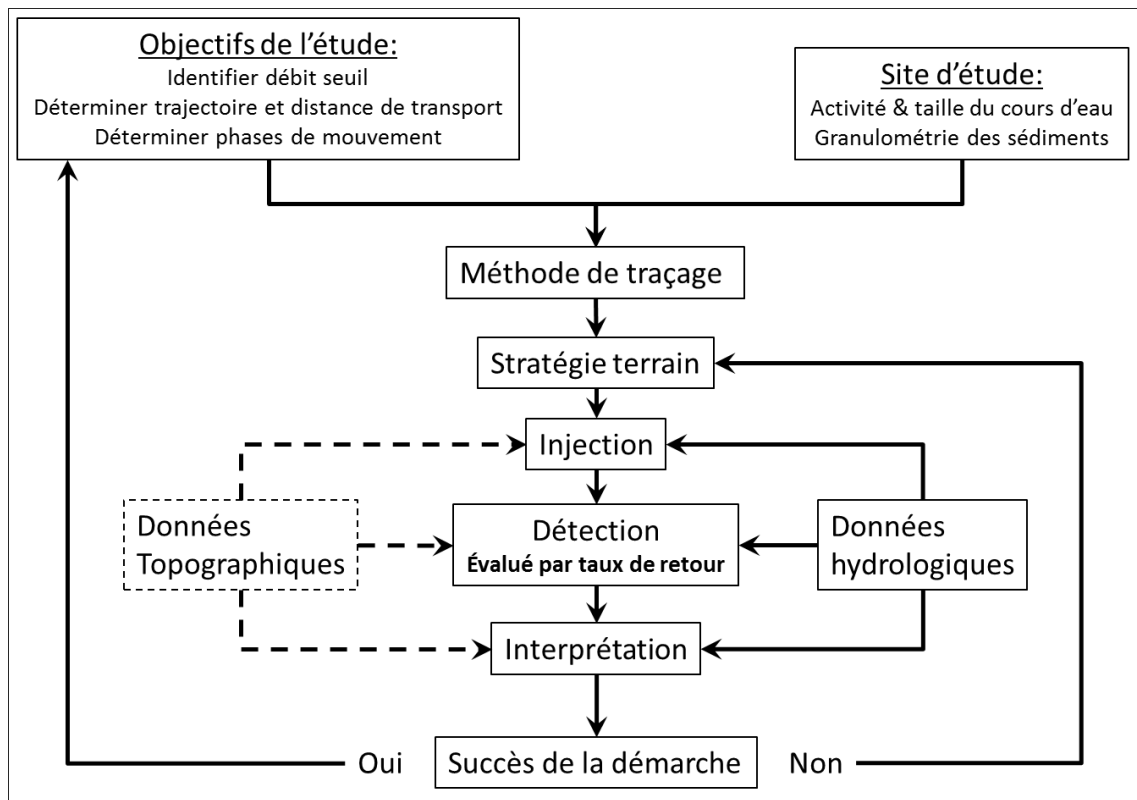
Il existe dans la littérature de nombreuses formules pour calculer des flux sédimentaires (Meyer-Peter et Müller, 1948; Engelund et Hansen, 1967; Ackers et White, 1973; Parker et Klingeman, 1982; Recking *et al.*, 2008; Piton et Recking, 2017). Les auteurs font l'hypothèse que le transport solide est un phénomène à seuil et se basent généralement sur l'excès de contrainte (*e.g.*  $\tau^* - \tau^*c$ ) au lieu de la contrainte seule. Elles sont calibrées empiriquement à l'aide de mesures expérimentales en canal ou *in situ*. Ces mesures permettent d'obtenir :

- des données discrètes :
  - par placettes de particules peintes, à partir desquelles il est possible de déterminer s'il y a mouvement ou non, et pour quelle taille de particule ;
  - par traceurs sédimentaires, qui fournissent des informations la fréquence de mobilité, sur les distances de transport et les trajectoires empruntées ;
  - par échantillonneurs type Helley et Smith qui fournissent au moment d'un évènement critique un volume de sédiment en transit pendant un temps relativement court en un point donné du lit du cours d'eau
- des données continues :
  - obtenues directement à partir par exemple de trappes à sédiments (Habersack *et al.*, 2016).
  - ou obtenues indirectement (Gray *et al.*, 2010) à l'aide :
    - de géophones (*e.g.* *geophone plate*. (Geay, 2013; Wyss *et al.*, 2016a, 2016b) ;

- d'hydrophones (Bogen et Møen, 2003; Habersack *et al.*, 2010; Mizuyama *et al.*, 2010; Møen *et al.*, 2010; Belleudy *et al.*, 2010, 2014, Rickenmann *et al.*, 2012, 2014; Rickenmann, 2017) ;
- de détecteur d'impacts (e.g. *impact plate*. Burtin *et al.*, 2011; Barrière *et al.*, 2015; Soar et Downs, 2017)
- ou potentiellement, puisque cantonner aux travaux en canal pour l'instant, de dispositifs acoustiques à effet Doppler (e.g. *Acoustic Doppler Velocity Profiler*. Blanckaert *et al.*, 2017).

Les méthodes pour obtenir indirectement des données continues présentent un très grand potentiel et sont toujours au cœur d'intenses travaux pour leurs calibrations *in situ*. L'objectif des travaux les plus récents est, outre la calibration *in situ*, de raffiner au maximum les informations qu'il est possible de retirer des signaux mesurés (e.g. flux brut, parts des franges de la granulométrie en transit).

Pour le suivi *in situ* du déplacement des particules, on emploie des traceurs sédimentaires : c'est à dire des sédiments naturels ou artificiels équipés de dispositifs de suivis (Foster et Meeting, 2000; Hassan et Ergenzinger, 2003; Hassan et Roy, 2016). Les caractéristiques des dispositifs de suivis (durée de vie, taille, intervalle et distance de communication, etc...) sont très variables (Tableau 9). Le choix du dispositif est fonction des processus ciblés et des besoins de résolutions spatiotemporelles de l'étude (mesurer des distances et directions de transports ou déterminer les phases de mouvements) ainsi que des moyens financiers et humains. Ces différents éléments sont identifiés lors de la conception de l'expérimentation. Celle-ci s'organise selon une succession d'étapes (Figure 30), formalisée par Hassan et Ergenzinger (2003), depuis l'identification des besoins de l'étude jusqu'à l'évaluation du succès de la démarche.



**Figure 30. Démarche de conception d'une expérimentation de traçage sédimentaire (Adaptée d'après Hassan et Roy (2003)).**

Au cours de la conception de l'expérimentation le choix d'un dispositif de traçage plutôt qu'un autre peut s'avérer crucial afin d'atteindre les objectifs souhaités. Depuis les travaux pionnier d'Einstein (1937) en canal, puis de Takayama (1965) et Leopold *et al.* (1966) en rivières, des décennies de recherche ont conduit au développement d'une grande variété de méthodes de traçage sédimentaire : particules peintes, sédiments exogènes, de scories métalliques, d'éléments radioactifs ou magnétiques ou, plus récemment, de radio étiquettes (*Radio Frequency Identification* : RFID) dont ce travail traitera plus en détails ci-après. Ces méthodes peuvent être comparées, et leurs pertinences évaluées dans le cadre d'une étude de terrain, selon plusieurs critères (Tableau 9 et Tableau 10) : Coût, facilité de détection des particules en surface ou enfouies, précision de positionnement, type de données collectées, durée de vie, distances de détection, impact sur l'environnement et taux de retour (Hassan et Roy, 2016; Sear *et al.*, 2008). On distingue généralement deux types de traceurs :

- les traceurs passifs qu'il faut repérer visuellement ou activer puis détecter à l'aide d'un émetteur/détecteur ;
- les traceurs actifs qui émettent eux-mêmes un signal (radio ou sonores) qui est détecté par un système de réception.

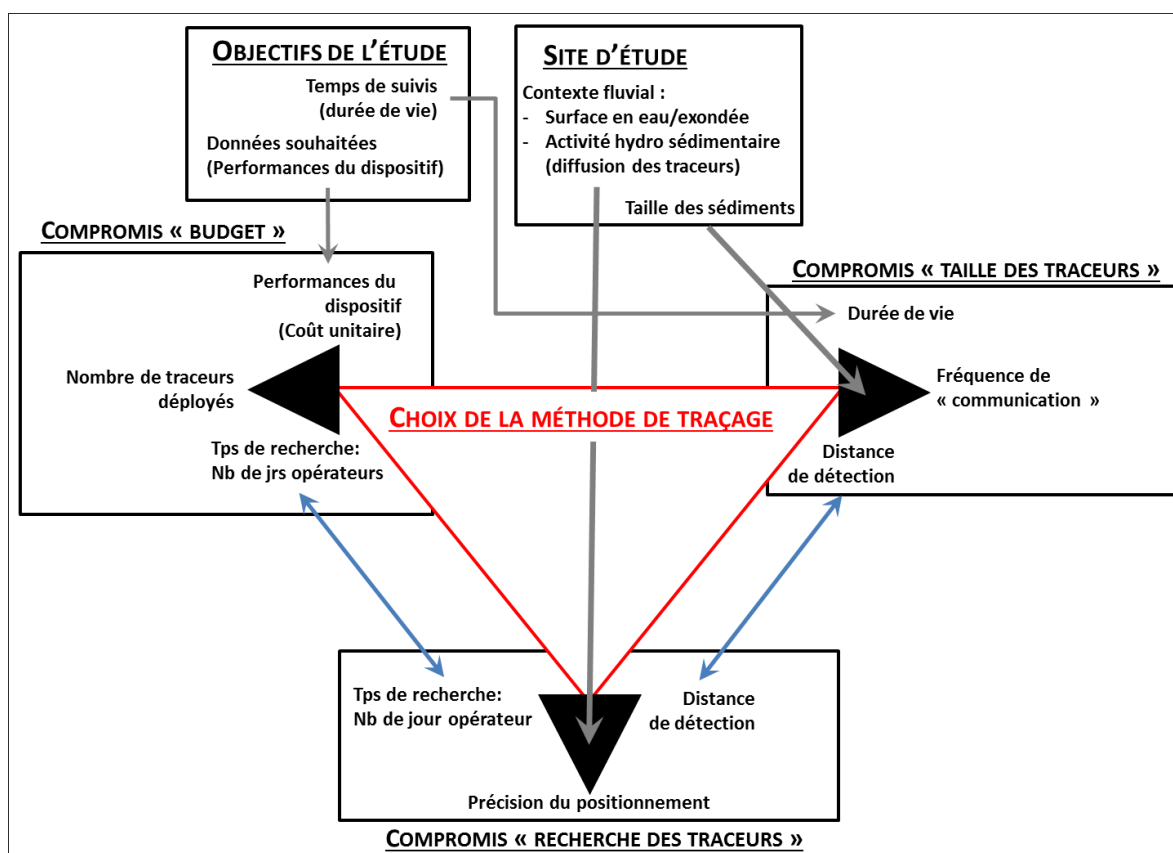
<b>Types de traceur</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>	<b>Durée de vie</b>	<b>Problématiques étudiées</b>
<b>Particules exogènes</b>	Bon marché, facile à mettre en œuvre, recherche en surface	Limité à la surface, faible taux de retour	Permanent	Affinement granulométrique, Tx. de météorisation, dispersion spatiale, Id. des sources et des destinations
<b>Particules peintes</b>	Bon marché, facile à mettre en œuvre, recherche en surface	Limité à la surface, faible taux de retour, abrasion de la peinture	Fonction de l'abrasion de la peinture < 3 ans	Dist. de transport, Q de mise en mouvement, vit. virtuelle, dispersion spatiale, Id. des sources et des destinations
<b>Particules Fluorescentes</b>	Non toxique, facile à injecter, Bon marché, adapté aux systèmes à évolution lente, Beaucoup de particules équipées	Difficile à détecter, information quantitative uniquement, export rapide, transfert sur particule non suivies, affecté par la température, la lumière et la salinité	Fonction du type de colorant	Cf. Particules peintes
<b>Particules Radioactive</b>	Taux de retour élevés, très puissant, détection des particules en surface et enfouies	Toxique pour le milieu, risque pour l'environnement et le public, manipulation compliquée, besoins d'équipement spécifique, limité aux zones sans fond radioactif	Limité par demi-vie de l'élément radioactif	dist. de transport, Q de mise en mouvement, disp. spatiale 3D, profondeur d'enfouissement, vol. de sédiment mobile, Id. des sources et des destinations
<b>Revêtement d'oxyde ferrique</b>	Bon marché, facile à mettre en œuvre	Limitée aux particules > 11 mm, affecté le bruit généré par des déchets métalliques, recherches laborieuses sur le terrain, difficile à adapté en eau profonde, abrasion du revêtement	Cf. particules peintes	dist. de transport, vit. virtuelle, profondeur ou enfouissement, disp. 3D, Q de mise en mouvement, vol. de sédiment mobile, Id. des sources et des destinations
<b>Bandes ou bouchons métalliques</b>	Bon marché, facile à mettre en œuvre	Affecté le bruit généré par des déchets métalliques, décollement des particules, limité à des particules larges, recherches perturbent le lit, Recherches laborieuses sur le terrain, difficile à adapté en eau profonde	Fonction de l'abrasion et de la fracture des particules	Cf. revêtement d'oxyde ferrique
<b>Cœur ferrique</b>	Longue durée de vie, bon marché, facile à mettre en œuvre, détection des particules en surface et enfouies	Limité à des particules larges, Tx. de retour faible, affecté le bruit généré par des déchets métalliques, recherches laborieuses sur le terrain, difficile à adapté en eau profonde, recherches perturbent le lit, peu altérer la densité des particules	Permanent	Vit. virtuelle, profondeur ou enfouissement, disp. 3D, Id. des sources et des destinations, vol. de sédiment mobile, Tx. de météorisation, Q de mise en mouvement, affi. granulométrique, dist. de transport
<b>Insertion d'aimant</b>	Tx. de retours élevés, détec. des particules en surface et enfouies, bon marché, Facile à mettre en œuvre	recherches laborieuses sur le terrain, affecté par bruit de fond, difficile à adapter en eau profonde, recherches perturbent le lit	Permanent	Cf. cœur ferrique

<b>Types de traceur</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>	<b>Durée de vie</b>	<b>Problématiques étudiées</b>
<b>Magnétisme naturel</b>	Pas de cout, nombre de traceurs illimité, facile à mettre en œuvre	Difficile de tracer individuellement des particules, système de détection fixe, nécessite équipement de terrain et technicien spécialisé, affecté par bruit de fond, Recherches perturbent le lit	Permanent	Cf. cœur ferrique
<b>Magnétisme artificiel</b>	Taux de retour élevés, facile à mettre en œuvre	Relativement bon marché, affecté par bruit de fond, recherches perturbent le lit, caractéristiques des particules différentes du matériel naturel	Permanent	Cf. cœur ferrique
<b>Magnétisme optimisé</b>	Toute taille peut être équipée, taux de retour raisonnables, détection des particules en surface et enfouies	Recherches perturbent le lit, cout de préparation, nécessite un four spécifique, forte teneur en fer du matériau, fracture lors de stress thermique, relativement bon marché, recherches laborieuses sur le terrain	Permanent	Cf. cœur ferrique
<b>Radio transmetteur</b>	Performant, taux de retour élevés, fétection des particules en surface et enfouies, suivi en continue de la position de la particule durant les crues	Couteux Limité aux particules grossières Nombre de traceurs limités	≈ 1 an	Dist. d'un mouvement et durées d'arrêt, moment d'entraînement, dist. de transport, enfouissement et profondeurs, trajectoire de déplacement, Id. sources et destination, vol. de sédiment, vit. virtuelle
<b>Radio étiquette passive : PIT-tags. Techno. RFID</b>	Suivi individuel des particules, détection par système mobile ou fixe, détection des particules en surface et enfouies, facile à mettre en œuvre, durable	Recherches laborieuses sur le terrain, Limité aux particules > 40 mm, affecté par bruit de fond, difficile à adapté en eau profonde, recherches perturbent le lit, efficacité diminue avec la taille des cours d'eau	Longue (> 50 ans)	Cf. cœur ferrique

**Tableau 9. Méthodes de traçage des sédiments (adaptée d'après Hassan et Roy, 2016)**

Le choix de la méthode de traçage sédimentaire adoptée pour une étude s'opère selon une série de compromis interdépendants, principalement liés (Figure 31):

- au budget disponible à la fois pour l'équipement (coût unitaire et nombre de traceurs) et de fonctionnement (temps de recherche et nombre d'opérateur(s) nécessaire(s)) ;
- à la nécessité pour les traceurs de bien représenter des sédiments du site d'étude (la taille est la contrainte principale, même si selon les cours d'eau étudiés, la forme peut aussi représenter une contrainte) ;
- à la recherche des traceurs lors des suivis (distance de détection, précision du positionnement, dispersion des traceurs dans l'espace) ;



**Figure 31. Réflexions et compromis liés au choix d'une méthode de traçage sédimentaire.**  
Notes : les triangles noirs symbolisent des compromis encadrés et nommés entre « », les flèches bleues : des interdépendances entre éléments entrant en compte dans les compromis, les flèches grises : des contraintes unidirectionnelles liée aux besoins ou au site d'étude.

L'efficacité d'une méthode de traçage sédimentaire est notamment appréhendée au travers d'une statistique simple : le taux de retour. Cela correspond au nombre de traceurs retrouvés au cours de différentes opérations de suivis au cours du temps et divisés par le nombre de traceurs injectés en début d'étude. Ce taux de retour est fonction de deux éléments indépendants :



- La taille et l'activité du cours d'eau étudié qui vont conditionner l'ampleur de l'espace sur lequel rechercher les traceurs au cours de suivis successifs ;
- La performance du dispositif, qui correspond à la facilité à détecter et positionner rapidement dans l'espace de recherche les traceurs au cours d'une opération de suivi.

Les taux de retour mentionnés dans la littérature sont très variables selon (1) les méthodes employées et (2) les systèmes fluviaux étudiés (Tableau 10).

<b>Méthodes</b>	<b>Références</b>	<b>Taux de retour (%)</b>
<b>Particules peintes</b>	Takayama (1965)	10-40
	Leopold <i>et al.</i> (1966)	0-88
	Keller (1970)	41-65
	Church (1972)	élevé
	Laronne et Carson (1976)	5
	Thorne et Lewin (1979)	40-79
	Sear (1996)	35-100
	Lenzi (2004)	52-100
	McNamara <i>et al.</i> (2008)	13
	Ferguson <i>et al.</i> (2017)	48-100
<b>Sédiments exogènes</b>	Mosley (1978)	5
	Kondolf et Matthews (1986)	n/a
	Rovira et Kondolf (2008)	95-98
<b>Scories métalliques</b>	Nir (1964)	4
	Houbrechts et Petit (2003)	n/a
	Houbrechts <i>et al.</i> (2011)	n/a
<b>Eléments radioactifs</b>	Ramette et Heuzel (1962)	100
	Stelczer (1968)	100
	Michalik et Bartnik (1994)	100
<b>Eléments magnétiques</b>	Schmidt et Gintz (1995)	n/a
	Ferguson <i>et al.</i> (2002)	32-47
	Hassan <i>et al.</i> (2013)	25-100
	Vázquez-Tarrío et Menéndez-Duarte (2014, 2015)	0-100
	Pelosi <i>et al.</i> (2016)	n/a
<b>Radio transmetteur</b>	Habersack (2001)	100
	Lenzi (2004)	Elevé
	McNamara et Borden (2004)	100
	McNamara <i>et al.</i> (2008)	26
<b>Radio étiquettes passive basse fréquences (RFID)</b>	Nichols (2004)	96
	Lamarre <i>et al.</i> (2005)	87-96
	Allan <i>et al.</i> (2006)	18-41-100
	Carré <i>et al.</i> (2007)	97
	Rollet (2007)	25-36
	Lamarre et Roy (2008a)	84-100
	Lamarre et Roy (2008b)	57-92
	Rollet <i>et al.</i> (2008)	36
	Benelli <i>et al.</i> (2009)	n/a
	Lauth et Papanicolaou (2009)	n/a

	Liébault <i>et al.</i> (2009)	88
	Camenen <i>et al.</i> (2010)	12-80
	Schneider <i>et al.</i> (2010)	30
	Capanni (2011)	47-95
	Houbrechts <i>et al.</i> (2011)	n/a
	MacVicar et Roy (2011)	66-94
	Miller <i>et al.</i> (2011)	0-100
	Arnaud (2012)	42
	Biron <i>et al.</i> (2012)	54-100
	Houbrechts <i>et al.</i> (2012)	80-97
	Liébault <i>et al.</i> (2012)	25-78
	Nathan Bradley et Tucker (2012)	>93
	Miller et Warrick (2012)	93-100
	Phillips <i>et al.</i> (2013)	62-100
	Milan (2013)	43-92
	Phillips et Jerolmack (2014)	62-100
	Chapuis (2012) ; Chapuis <i>et al.</i> (2015)	40
	Dell'Agnesse <i>et al.</i> (2015)	54-100
	Mao <i>et al.</i> (2016)	44
	Imhoff et Wilcox (2016)	68-86
	Arnaud <i>et al.</i> (2017)	11-43

**Tableau 10. Taux de retour de différentes méthodes de traçage (adapté de Hassan et Roy (2016)).**

*Notes : les « n/a » renvoient à des taux de retour non-mentionnés en raison de (1) leur utilisation en canal expérimental ou (2) parce que les traceurs employés, par exemple les scories métalliques, sont non déployés par les chercheurs car présents avant le début de l'étude.*

Les données collectées à l'aide des traceurs (trajectoire et distance de transport, phases de mouvement et d'arrêt, ...) sont particulièrement intéressantes à rapprocher d'autres données telles que :

- les données hydrologiques (débits) et la granulométrie des traceurs. Il est possible d'établir les débits seuils de mise en mouvement, de déterminer ainsi la durée de dépassement de la force tractrice critique ( $\tau^*c$ ) afin de calculer les vitesses virtuelles (*virtual velocity*) de déplacement des particules (Church et Hassan, 1992; Ferguson et Wathen, 1998; Haschenburger et Church, 1998; Liébault *et al.*, 2012; Houbrechts *et al.*, 2015) ;
- les données topographiques obtenues grâce à des chaînes d'érosion (Chapuis *et al.*, 2015) ou des modèles numériques de terrain. Il est alors possible d'analyser l'évolution des macroformes (bancs de sédiments, nappe de charriage) ou de masses de sédiment et d'établir des bilans sédimentaires.

Ces dernières années, les transpondeurs passifs (*Passive Integrated Transponders* : PIT-tags) empruntés aux études de suivis des poissons sont de plus en plus employés par les

scientifique. Les PIT-tag sont de petits transpondeurs passifs (sans batterie) de forme cylindrique (diamètre = 3.8 mm) de différentes longueurs (32, 23 ou 12 mm). Ils communiquent avec une antenne, soit fixe (en sortie du tronçon d'étude), soit mobile (pour prospecter les surfaces du site d'étude), par ondes basses fréquences (125-135 kHz) lorsqu'ils se trouvent dans son champ magnétique. L'antenne fonctionne alternativement comme émetteur (pour charger le condensateur du PIT-tag) puis comme récepteur (pour détecter le signal émis par le PIT-tag une fois chargé) par cycle d'environ 0.09 seconde (Tsakiris *et al.*, 2015). Ce système offre notamment comme avantages (Lamarre *et al.*, 2005; Rollet, 2007; Lamarre et Roy, 2008a; MacVicar et Roy, 2011; Liébault *et al.*, 2012; Nathan Bradley et Tucker, 2012; Phillips *et al.*, 2013; Phillips et Jerolmack, 2014; Chapuis *et al.*, 2015; Dell'Agnese *et al.*, 2015; Imhoff et Wilcox, 2016; Mao *et al.*, 2016b; Arnaud *et al.*, 2017) :

- une identification individuelle de chaque traceur ;
- une détection des traceurs même enfouis ;
- un faible coût ;
- une longue durée de vie ;
- la possibilité d'équiper des particules directement sur le terrain ;

Sa large utilisation a aussi permis d'identifier un certain nombre de limites :

- une distance de détection faible (< 1 mètre), dépendante de la taille des PIT-tags, de la taille et de la forme de l'antenne ;
- des problèmes de détection liés à des interférences lorsque les radio-étiquettes sont trop proches l'une de l'autre ;
- une recherche compliquée en eaux profondes et fastidieuses sur les systèmes fluviaux grands ou très actifs.

Dans les cours d'eau très actifs, par exemple divagants ou en tresses, de faibles taux de retour (< 50%, voire Tableau 10) ont été rapportés. Cela a suscité de nombreuses interrogations quant aux limites de cette technologie et a permis d'identifier 5 éléments d'explication : (1) un enfouissement supérieur à la distance de détection, (2) une recherche incomplète de la surface explorée, (3) une dispersion des traceurs au-delà de la zone d'étude, (4) des interférences du signal liées à la présence de matériaux ferreux à proximité des radio-étiquettes ou encore (5) la destruction du traceur et de sa radio-étiquette. Quelques études techniques des facteurs qui peuvent influencer à la fois la bonne détection et les distances de détection de ces traceurs ont été menées. Elles ont notamment permis :

- d'identifier la dépendance de la distance de détection à l'orientation relative du PIT-tag par rapport au plan de l'antenne et de définir ainsi les enveloppes de détection des antennes (Chapuis *et al.*, 2014; Arnaud *et al.*, 2015) ;
- de caractériser les perturbations de signal provoquées par la proximité d'autre(s) PIT-tag(s) ou d'objets métalliques (Chapuis *et al.*, 2014) ;
- d'optimiser ainsi les stratégies d'injection (injecter un grand nombre de traceurs), de suivi sur le terrain (développer des antennes spécifiques) et d'équipement des particules tracées (Arnaud *et al.*, 2015; Piégay *et al.*, 2016).

Or, ces traceurs constituent des outils très pertinents pour l'étude du transport solide et le développement de cette technologie constitue encore un domaine de recherche très actif.

#### **1.3.4.3 Caractérisation des phases de la mobilité à l'échelle des particules**

Pour déterminer les phases de mouvements à des échelles spatiotemporelles plus fines il y a deux techniques qui convergent vers une même approche de modélisation dans laquelle on cherche à estimer les probabilités de durée et de distance de transport ainsi que des temps de pause ou d'arrêt :

- La première technique emploie des radio-transmetteurs dont on mesure les variations d'intensité du signal reçu par une ou plusieurs antennes afin de localiser au cours du temps, les traceurs dans un espace plan défini en deux dimensions (Schmidt et Ergenzinger, 1992a; Habersack, 2001; Liedermann *et al.*, 2013). Les auteurs parviennent alors à reconstituer la trajectoire 2D d'une ou plusieurs particules au cours d'un temps pouvant atteindre une année selon la résolution spatio-temporelle étudiée ;
- La seconde technique utilise des capteurs de mouvement dont les données binaires de type mouvement/arrêt (McNamara et Borden, 2004; Olinde, 2015; Olinde et Johnson, 2015) à un instant  $t$  sont enregistrées par les capteurs. Il faut ensuite récupérer ces capteurs et décharger les données pour les analyser. La capacité de stockage de données des capteurs sont une de leur limite : il oblige à un compromis entre résolution temporelle d'un côté (c.-à-d., la fréquence à laquelle l'information est enregistrée), et la durée d'acquisition de l'autre. Afin d'augmenter la durée du suivi, il faut parfois réduire la résolution temporelle et intégrer l'information relative au mouvement à une résolution de plusieurs minutes.

Les données obtenues à ces résolutions temporelles sont très intéressantes puisqu'elles permettent de déterminer à quel moment et pour combien de temps les particules sont à l'arrêt

ou en mouvement. Ces données soulignent la nécessité d'une approche probabiliste pour la modélisation des différentes phases du déplacement des particules sédimentaires.

#### **1.3.4.4 Synthèse sur la caractérisation du transport solide par charriage**

Les techniques de mesures indirectes en continue présentent un potentiel très intéressant dans la perspective de :

- déterminer les tranches de la granulométrie mobilisées puis déposées à mesure que le débit et la force tractrice augmentent puis diminuent au cours d'une crue. Il serait notamment intéressant de déterminer dans quelle mesure le dépôt, comme l'entraînement, s'opère effectivement par un effet de seuil.
- Caler les formules mathématiques permettant d'estimer le transport solide

Les traceurs constituent aujourd'hui la seule technique pour déterminer les distances de transport et les trajectoires empruntées par les particules dans le lit mineur. Or, ce type de données est tout aussi important scientifiquement que la détermination des flux. Les distances et trajectoires de transport permettent d'analyser la dynamique de fonctionnement des macroformes, comment les propriétés géométriques des particules influencent les modalités (phases de mouvement et d'arrêt) de la mobilité de ces particules et l'emprise spatiale sur laquelle se manifeste le flux sédimentaire. Aussi l'emploi de traceurs reste incontournable dans l'étude du transport solide.

#### **1.3.5 Les facteurs conditionnant la mobilité propre à la particule**

À l'échelle de la particule, il est possible de schématiser ses propriétés et les éléments de son environnement qui influencent sa mobilité, voire de modéliser certaines relations entre ces éléments, mais il n'existe aucun modèle intégré permettant de prédire le déplacement d'une particule (Turowski *et al.*, 2011) dans l'espace.

Et pour cause, la mobilité d'une particule est dirigée par (Figure 32):

- ses propriétés intrinsèques : taille (volume), masse (densité), forme, émoussé,... ;
- les propriétés de l'écoulement (vitesse au fond, masse volumique, turbulences,...) ;
- la granulométrie de la masse sédimentaire environnante ;
- la structure du lit : imbrication, masquage, surexposition (Wiberg et Smith, 1987; Lamb *et al.*, 2008) ;
- sa position dans le chenal (par rapport aux veines fluides les plus puissantes ou à l'échelle de la macro forme) ;

Qui plus est, ces éléments s'articulent selon des mécanismes complexes, c'est-à-dire que leurs interactions engendrent de nouvelles propriétés dans le fonctionnement du système et qui viennent s'ajouter et parfois atténuer ou accentuer les effets des facteurs pris en compte séparément. Leur influence varie, non seulement spatialement et temporellement, mais également en fonction des différentes phases de la mobilité (entraînement, déplacement, dépôt).

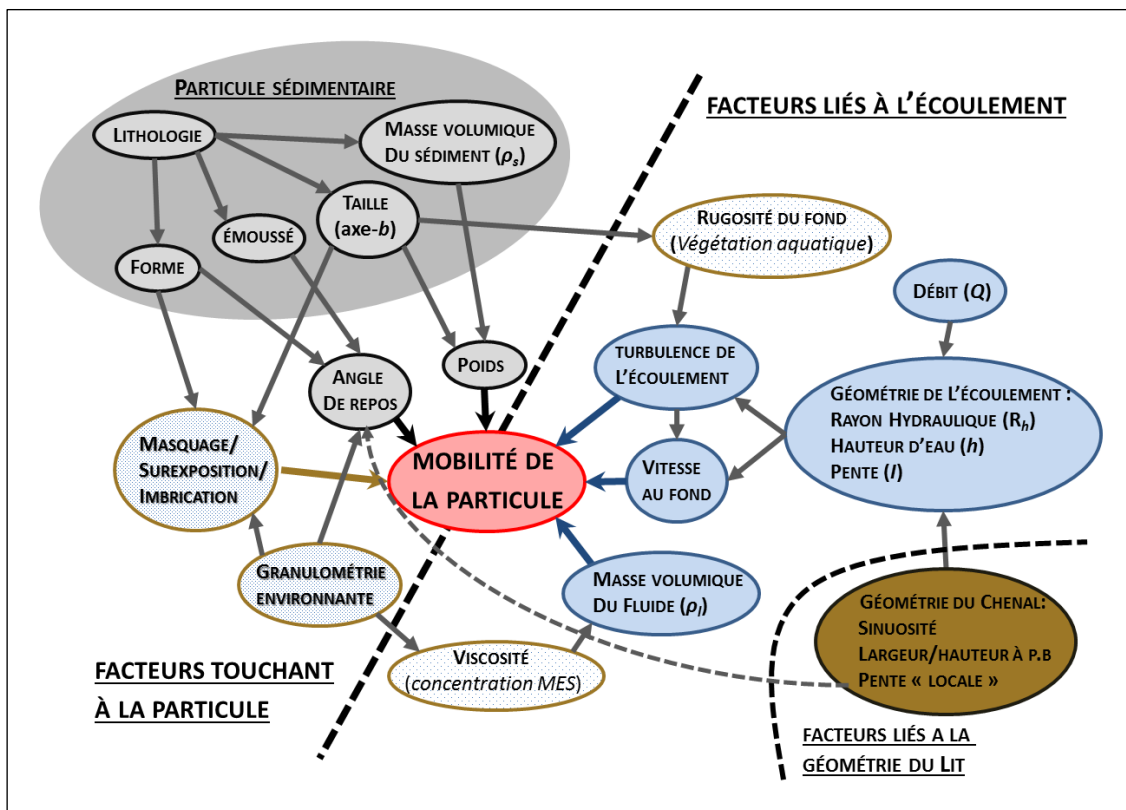
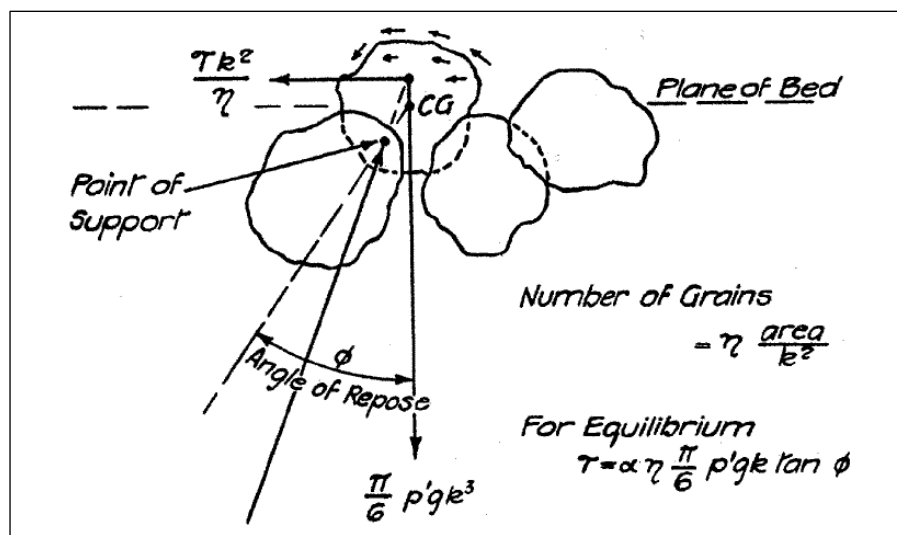


Figure 32. Facteurs qui influencent *in situ* la mise en mouvement et le déplacement d'une particule sédimentaire (modifié d'après Chapuis, 2012).

D'un point de vue strictement physique, on peut dresser le bilan des forces s'appliquant sur une particule sédimentaire positionnée dans un plan qui intègre au minimum une dimension verticale (pesanteur oblige) et horizontale (écoulement et pente la dirigent). L'intégration d'une troisième dimension, latérale, ajoute un degré de complexité que ce travail ne traitera pas. Les forces en présence sont la pesanteur (liée au volume et à la densité de la particule), la poussée d'Archimède (qui s'oppose à la pesanteur et implique également volume et densité de la particule), la portance (liée à la vitesse et à la masse volumique du fluide ainsi qu'à la forme de la particule) et la traînée. La schématisation du bilan des forces et leur établissement mettent en avant la taille ou plutôt le volume et la forme qui jouent un rôle évident sur sa mise en mouvement.

La relation entre taille et mobilité a été conceptualisée par le diagramme de Hjulström (1935, Figure 29) qui représente les trois moments du transport solide (*erosion*, *transport* et *deposition*) en fonction de la taille des particules (*grain size*) et la vitesse de l'écoulement (*flow speed*). Ce diagramme illustre bien le fait qu'au-dessus de 2 mm, les courbes définissant les domaines érosion/transport/dépôt se rapprochent, l'intervalle des vitesses de transport définissant le domaine du transport est très réduit et certains auteurs (Malavoi *et al.*, 2011) y voient là un caractère « transitoire » du charriage. Depuis les travaux pionniers de Meyer-Peter et Müller (1948) qui intègrent la taille (comme proxy du volume) associée à la densité pour établir la masse des particules dans leur formule de calcul du transport solide, il existe un consensus au sein de la communauté scientifique qui travaille sur le transport solide. Ce consensus s'établit autour du fait que la taille et la densité sont les principaux facteurs de contrôle de la mobilité des particules et sur lesquels repose une modélisation des flux de sédiments transportés.

Pourtant, le rôle essentiel de la forme des particules sur leurs mobilités est souligné par un grand nombre d'études mécanistiques. Ce rôle est généralement illustré au travers du concept d'angle de repos (*angle of repose* aussi appelé *pivoting angle* dans la bibliographie anglo-saxonne), d'abord développé par White (1940) dans un contexte de granulométrie uniforme (Figure 33).



**Figure 33. Concept d'angle de repos de White (1940).**

Plus l'angle de repos est grand, plus la force nécessaire pour faire levier et soulever la particule par son coté amont est grande et donc plus la particule sera difficile à entrainer. L'angle de repos, noté  $\Phi$ , est ensuite adapté sur fond rocheux fixe (Miller et Byrne, 1966), puis pour des granulométries hétérogènes (Komar et Li, 1986; Li et Komar, 1986; Kirchner *et*

al., 1990) approfondissant ainsi le concept de transport sélectif des particules lié à leur forme. Outre la dépendance de l'angle de repos ( $\Phi$ ) à la taille ( $D_i$ ) de la particule à mobiliser, à la taille ( $D_k$ ) des particules sur lesquelles repose la particule à mobiliser et à l'agencement des particules les unes par rapport aux autres (Figure 34), les auteurs formalisent la relation suivante :

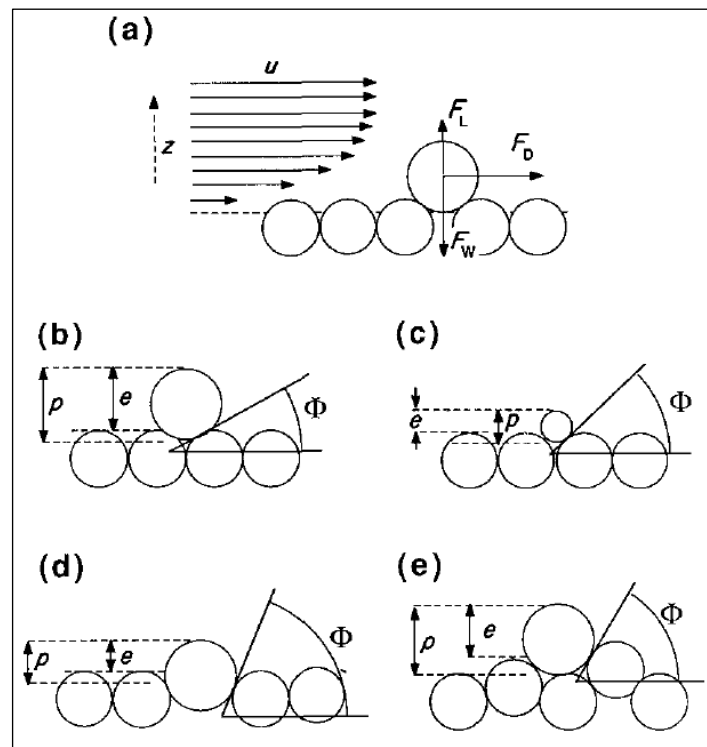
$$\Phi = e \left( \frac{D_i}{D_k} \right)^{-f}$$

Où,  $e$  et  $f$  sont des coefficients que les auteurs ont déterminé empiriquement pour des particules sphériques, ellipsoïdales ou anguleuses avec et sans imbrication. Ainsi, l'angle de repos est inversement proportionnel au rapport  $D_i / D_k$  et  $\Phi$  diminue à mesure que  $D_i$  augmente. Le rapport  $D_i / D_k$  qui peut être assimilé à un descripteur de la rugosité du lit, conditionne le transport préférentiel de particules de certaines formes. En effet, Demir et Walsh (2005) ont montré en rivière un transport préférentiel des particules de formes allongées et aplaties dans les lits à la rugosité marquée ( $D_k \ll D_i$ ). Les auteurs attribuent ce transport préférentiel au fait que ces formes tendent à ricocher sur le sommet des particules du lit ou à se déposer à cheval entre deux parties sommitales de particules immobiles tandis que les particules mobiles de forme sphérique auraient tendance à être piégées dans les creux entre les particules immobiles et être ainsi masquées aux veines fluides les plus puissantes de l'écoulement. Sur les lits peu rugueux ( $D_i < D_k$  où la roche mère est lissée par l'érosion) les particules de formes allongées et aplaties sont au contraire désavantagées et on assiste alors plutôt au transport préférentiel des particules sphériques ou elliptiques (Schmidt et Ergenzinger, 1992a).

L'une des limites du concept d'angle de repos est de considérer l'entraînement de la particule essentiellement par rotation. Or, il y a des auteurs qui ont proposé une approche théorique du déplacement des particules par glissement (ou *sliding*). Ces auteurs (Mears, 1979; Bradley et Mears, 1980) s'appuient sur quelques travaux (Einstein et El-Samni, 1949; Cheng et Clyde, 1972) qui soulignent de fortes fluctuations des forces de soulèvement (*lift forces*) et d'entraînement (*drag forces*) pouvant dans certains cas engendrer des mouvements verticaux, « sur place », d'amplitudes millimétriques des particules (Urbonas, 1968). Pour Komar et Li (1988), dans le cadre de mise en mouvement par glissement, un coefficient de friction ( $\mu_f$ ) peut être substitué à l'angle de repos ( $\Phi$ ). Ces auteurs soulignent toutefois la rareté des études (Groat, 1920; Isbash, 1936; Allen, 1947; Carling, 1983) permettant des évaluations de  $\mu_f$  et l'extrême variabilité de ces forces (*lift/drag*) en écoulement turbulent (Carling, 1983).



La transposition des modèles de la mise en mouvement par rotation à une mise en mouvement par glissement nécessite l'acceptation d'une hypothèse très forte (Komar et Li, 1988) selon laquelle  $\mu_f$  est constant. À ce jour, aucune étude ne permet de déterminer si une particule va avoir tendance à être mobilisée par rotation ou glissement et, si et comment, les caractéristiques géométriques (forme, émoussé et texture de surface) d'une particule peuvent influencer une forme de mobilisation plutôt qu'une autre. Il paraît tout à fait envisageable que les particules de formes allongées ou aplaties puissent être plus facilement mobilisées par glissement plutôt que par rotation puisque ces formes favorisent l'établissement d'une force de portance (conférée par un l'écoulement perpendiculaire à l'axe-c des particules) et sont aussi plus sensibles aux turbulences verticales du fluide. L'emploi de traceurs équipés d'accéléromètres représente un moyen pour explorer cette limite et les facteurs qui régissent le comportement des particules autour de cette limite : rotation/glissement.



**Figure 34. Schématisation de l'angle de repos d'une particule et des facteurs l'affectant, dans Kirchner *et al.*, (1990).**

**(a) angle de repos ; (b et c) effet de la taille des particules sur l'angle de repos ; (d, e) effet de l'imbrication des particules.**

Mais, le transport préférentiel lié à la forme est également sensible à d'autres paramètres. Il existe un grand nombre d'études mécanistiques qui traitent du phénomène, de sa complexité, et dans lesquelles les auteurs ont pu établir des relations entre un ou deux paramètres. Ainsi, le transport préférentiel lié à la forme des particules :

- diminue avec l'intensité des crues (Schmidt et Gintz, 1995),

- varie en fonction de l'hétérogénéité granulométrique (Buffington *et al.*, 1992),
- est sensible à l'imbrication des particules (Li et Komar, 1986; Kirchner *et al.*, 1990) que, par ailleurs, la forme des particules influence (Lane et Carlson, 1954; Hattingh et Illenberger, 1995),
- et à leur angularité (Miller et Byrne, 1966; Carling *et al.*, 1992).

### **1.3.6 Synthèse sur la caractérisation du transport solide par charriage**

Bien que Bridge et Bennett (1992) aient proposé un modèle « pour l'entraînement et le transport » de particules sédimentaires à granulométrie hétérogène basé sur leur taille, forme et densité, ils le qualifient comme très dépendant de l'angle de repos. Et, il demeure très compliqué de décrire un schéma du transport préférentiel lié à la forme intégrant tous ces facteurs. Et quand bien même l'effet de la forme des particules sur leur entraînement serait expliqué et modélisé, qu'en est-il pendant le déplacement des particules ? Il n'existe pas d'étude traitant de l'effet de la forme sur le déplacement des particules, c'est-à-dire sur leur comportement un fois mobilisées. Il s'agirait notamment de déterminer des différentielles sur les vitesses de déplacement (bien qu'il existe des études sur les vitesses de chute en écoulement nulles voire Syvitski (1991), Roux (2004) ou encore Nielsen (2009)) et l'enchaînement de rebonds successifs au travers d'une approche probabiliste (les probabilités d'enchaîner un, deux, trois, ... rebonds avant un arrêt). Il resterait ensuite à intégrer la variabilité des flux d'eau qui, dans les rivières graveleuses, est très forte spatialement et en intensité. Celle-ci commence à être appréhendée en canal et en rivières (Recking *et al.*, 2016). La question de la variabilité temporelle et notamment l'effet d'une rétroaction potentielle entre macroformes fluviales et flux liquides constituera sans doute le dernier obstacle à un modèle intégré du charriage dans les rivières graveleuses.

### **1.3.7 Les effets du transport solide sur les particules sédimentaires**

Le transport solide transforme la masse sédimentaire et les caractéristiques géométriques des particules sédimentaires.

#### **1.3.7.1 L'affinement granulométrique**

À l'échelle de la masse sédimentaire, on observe un affinement granulométrique (une décroissance de la taille des particules) avec l'éloignement à la source (Knighton, 1982; Shaw et Kellerhals, 1982; Brierley et Hickin, 1985; Brewer et Lewin, 1993; Kodama, 1994a; Ferguson *et al.*, 1996; Hoey et Ferguson, 1997; Morris et Williams, 1997, 1999; Surian, 2002;

Frings, 2008). Ce phénomène est formalisé par une loi empirique établie par Sternberg (1875) au travers d'une équation qui lie décroissance de la taille en fonction de la distance parcourue depuis la source.

$$D = D_0 \exp(-\beta l)$$

Où :

- $D_0$  = diamètre initial
- $D$  = diamètre à la distance  $l$
- $\beta$  = coefficient d'abrasion en  $m^{-1}$  qui représente le pourcentage de diminution du diamètre par unité de distance.

Il y a deux phénomènes généralement avancés pour expliquer l'affinement granulométrique vers l'aval (*downstream fining*) :

- le transport sélectif lié à la taille, qui provoque un transfert préférentiel vers l'aval des particules de plus petite taille (Russell, 1939; Rice et Church, 1998) Parker, 2004),
- et l'usure des particules qui produit une réduction de leur volume à mesure de leur transfert vers l'aval (Parker, 1991a).

Bien que de nombreux auteurs aient estimé que le transport sélectif est le processus dominant (Bradley *et al.*, 1972; Dawson, 1988; Seal et Paola, 1995; Ferguson *et al.*, 1996), d'autres auteurs ont démontré l'efficacité des processus d'érosion et d'abrasion en environnement fluvial (Kodama, 1994b; Mikoš et Jaeggi, 1995; Parker, 1991a, 1991b). Et nombre d'entre eux ont également observé que les particules anguleuses au moment de leur entrée dans le système fluvial, s'émoussent très rapidement vers l'aval (Gilbert, 1877; Kuenen, 1956; Pearce, 1971).

C'est sur ce second phénomène que ce travail va maintenant s'attarder, car les changements de morphologie des particules ne concernent pas seulement la taille mais aussi l'émoussé, et malgré tous les travaux réalisés à ce jour sur l'émoussé et sa mesure (Cf. section précédente), la relation entre émoussé et perte de masse ou de volume des particules reste assez peu abordée. Avant d'en arriver là, ce travail s'attachera à décrire les processus d'usure des particules et les facteurs qui la régissent au travers d'étude menées en milieu fluvial mais aussi en milieu côtier, gageant que les interrogations qui ont motivé ces différents travaux sont les mêmes.

### **1.3.7.2 L'usure des particules**

L'étude de l'usure des particules sédimentaires est riche d'un vocabulaire propre et de terme plus généraux employés par toutes les disciplines de la géomorphologie. Elle s'appuie

également sur des démarches variées et complémentaires employant un vocabulaire commun et parmi lesquelles on peut distinguer deux approches :

- les approches empiriques qui, au cours d'expériences visant à reproduire le plus fidèlement possible le charriage, identifient, décrivent et analysent les processus auxquels sont soumises les particules puis cherchent à quantifier et modéliser ces processus ;
- les approches plus théoriques, qui cherchent à modéliser un processus s'appuyant sur des expériences ne cherchant pas à mimer le charriage mais le seul processus étudié.

Aussi cette section apportera d'abord quelques précisions de vocabulaire, avant de présenter les premiers travaux empiriques. Elle exposera ensuite les processus ainsi identifiés et les facteurs qui les dirigent. Et enfin, elle tâchera de présenter les principaux apports des approches plus théoriques dans la description des processus d'érosion des particules.

#### 2.7.2.1 Quelques précisions sur les termes employés.

Il faut tout de suite aborder la nuance entre "abrasion" et "érosion" proposée par la tribologie (du grec *tribos* qui signifie gratter, frotter. Science des surfaces solides en contact) et que rapporte Attal (2003). L'abrasion et l'érosion affectent la structure des particules sédimentaires transportées en rivière au cours des contacts de celles-ci avec d'autres particules ou avec le substratum rocheux.

L'abrasion concerne les processus d'usure par frottement (produit par deux éléments en contact se déplaçant l'un par rapport à l'autre) sans facteur vitesse. Elle est définie comme un processus d'usure par le déplacement et/ou l'enlèvement de matière de la surface frottant sous l'action d'aspérités dures.

L'érosion comprend elle un facteur vitesse qui fait intervenir l'énergie cinétique des particules. Elle est définie par la perte de matière d'une surface due au contact d'un fluide en mouvement relatif contenant des particules solides. L'érosion est donc fonction de la taille, de la vitesse et d'un différentiel de dureté entre les deux surfaces s'impactant.

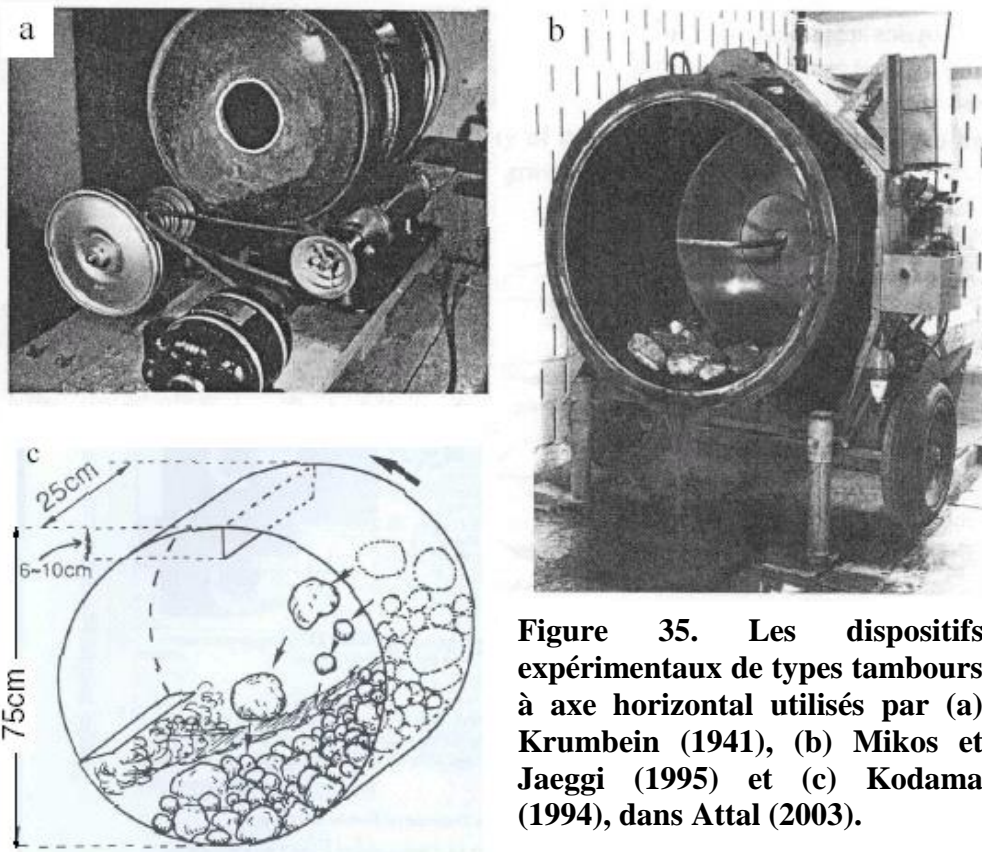
Mais dans la littérature les termes d'érosion et d'abrasion sont relativement confondus. L'érosion y apparaît comme un terme plus générique, en partie parce qu'il est aussi utilisé pour parler de l'évolution morphologique des macroformes. L'abrasion est plus spécifiquement liée à la transformation des particules que ce soit par abrasion ou érosion telle que définies ci-dessus. On retrouve aussi des termes comme attrition (qui produit des particules fines restant en suspension) et fragmentation (qui produit des particules supérieures à 0.5 mm dans Attal et Lavé (2009)).

### 2.7.2.2 Les dispositifs expérimentaux et les approches empiriques

Les premiers travaux sur l'abrasion des particules employaient différents dispositifs pour reproduire les mécanismes observés en milieu naturel lors du charriage. Cette approche très empirique visait à comprendre les facteurs qui contrôlent l'abrasion des particules pendant leur transport et son effet sur la morphologie des particules.

Il y eut d'abord les tambours à axe horizontal dont la facilité de mise en œuvre participa à leur large utilisation (Figure 35). Les sédiments sont mis en mouvement lorsque, par la rotation du tambour, ils ne sont plus stables à cause de l'augmentation de la pente et roulent jusqu'en bas de la pente puis sont remis en mouvement de la même manière. Ces premiers dispositifs ont permis notamment de dresser une liste de facteurs concourant à différents degrés à l'érosion des particules:

- émoussé: les éléments les plus anguleux qui arrivent dans le système fluvial sont rapidement érodés durant les premiers kilomètres de transport. Leur indice d'émoussé évolue rapidement puis s'établit le long d'une asymptote (Wentworth, 1919; Krumbein, 1941b)
- la dureté de la roche: les roches les plus dures présentent des taux d'abrasion les plus faibles (Schoklitsch, 1933; Kodama, 1994b)
- l'histoire des particules: le stockage des particules dans une plaine d'inondation provoque une altération qui les rend plus vulnérables à l'abrasion au cours d'une seconde phase de transport après déstockage (Jones et Humphrey, 1997).



**Figure 35.** Les dispositifs expérimentaux de types tambours à axe horizontal utilisés par (a) Krumbein (1941), (b) Mikos et Jaeggi (1995) et (c) Kodama (1994), dans Attal (2003).

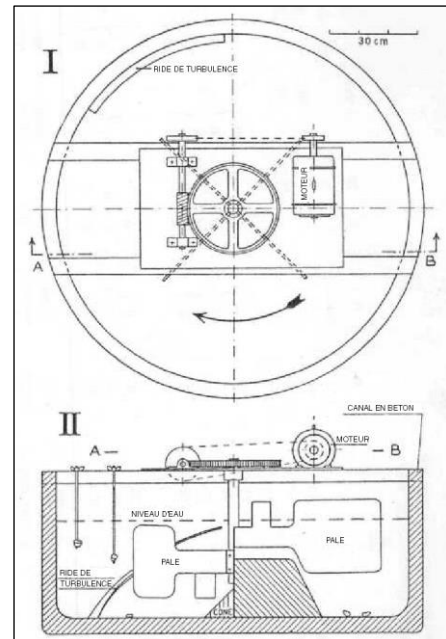
Malgré tout, ces dispositifs présentent un certain nombre de limites méthodologiques (Kuenen, 1956; Mikoš et Jaeggi, 1995; Attal, 2003). Ils fournissent en outre des taux d'abrasion sont jugés trop faibles par rapport à ceux observés en rivières (Kuenen, 1955, 1956; Bradley, 1970; Shaw et Kellerhals, 1982; Kodama, 1994b; Ferguson *et al.*, 1996; Surian, 2002). Ces limites méthodologiques sont les suivantes :

- ce n'est pas l'eau qui entraîne les particules ;
- les galets déstabilisés tombent et roulent sur une courte distance, s'arrêtent en bas de la pente et recommencent ce cycle, cela à des vitesses qui diffèrent selon leurs tailles, mais ce processus s'opère dans la masse et il n'y a donc pas de comportement particulaire indépendant ;
- l'usure des galets s'opère plus par stricte abrasion (frottements) que par érosion (dont les impacts entre particules);
- la méthodologie de calcul des distances parcourues par les particules est compliquée du fait des mouvements en masse des particules.

Les seconds dispositifs sont des canaux circulaires (Figure 36 et Figure 37). Ils ont été moins utilisés (Kuenen, 1955, 1956; Bradley, 1970; Attal, 2003; Attal *et al.*, 2006) même s'ils

permettent d'étudier séparément différents facteurs: nature du substratum, taille, émousé, vitesse et lithologie des galets. Le travail de Kuenen lui a ainsi permis de:

- lister et décrire les dépendances entre les différents facteurs qui dirigent l'érosion des particules sédimentaires ;
- et de détailler les processus physiques qui la régissent.



**Figure 36. Vue supérieure (I) et transversale (II) du canal circulaire de (Kuenen, 1955, 1956) dans Attal (2003).**

Même si les travaux de Kuenen représentent une contribution considérable à l'étude de l'érosion des particules sédimentaires au cours de leur transport, notamment grâce à la distinction des processus et à la description des facteurs qui les conditionnent, certains auteurs regrettent une absence de quantification des lois qui articulent les différents processus et facteurs ainsi qu'un manque de description des conditions hydrauliques du canal (Attal, 2003).

C'est ce qui a poussé Bradley (1970) à construire une réplique du canal de Kuenen pour notamment analyser le rôle de l'altération dans les phénomènes d'érosion liés au transport solide. À l'inverse de Kuenen, Bradley (1970) observe que l'éclatement des particules est un phénomène fréquent et efficace, et qu'il est guidé par les fractures et des discontinuités matérielles préexistantes.

De même, après avoir observé les mouvements verticaux, « sur place », de faible amplitude (quelques millimètres) mais de haute fréquence (28 mm « parcourus » en 10 secondes) d'un galet sur un lit graveleux, Schumm et Stevens (1973), soulèvent la question du potentiel érosif de la friction : pourrait-il expliquer les plus faibles taux d'érosion obtenus en laboratoire, où il n'est pas reproduit, comparés à ceux observés *in situ* ? La perte de masse du galet en question n'ayant pas été mesurée, l'abrasion sur place reste non quantifiée.

Plus récemment, Attal (2003) a développé un nouveau canal de forme annulaire dans lequel les galets sont entraînés par un courant d'eau créé par 4 points d'injection tangentielle.

Il reproduit ainsi les conditions hydrodynamiques du charriage (Figure 37). Attal *et al.* (2006) établissent ensuite le rôle des facteurs comme la masse totale de particules, leur granulométrie (et son homogénéité) et le débit liquide pour reproduire au sein du canal des vitesses de transport définies. Se basant sur les observations faites en canal, Attal et Lavé (2006) développent un modèle prédictif de l'évolution des caractéristiques des sédiments (taille et flux) en fonction de leur lithologie (taux d'abrasion spécifiques), de leur diamètre, de la part des différentes lithologies dans la masse sédimentaire et de la distance de transport. Enfin, ils le confrontent au fonctionnement d'un système fluvial himalayen et soulignent l'importance d'adapter le modèle en fonction des zones d'apport de sédiment et de développer ainsi un modèle intégrant les spécificités du système fluvial étudié.

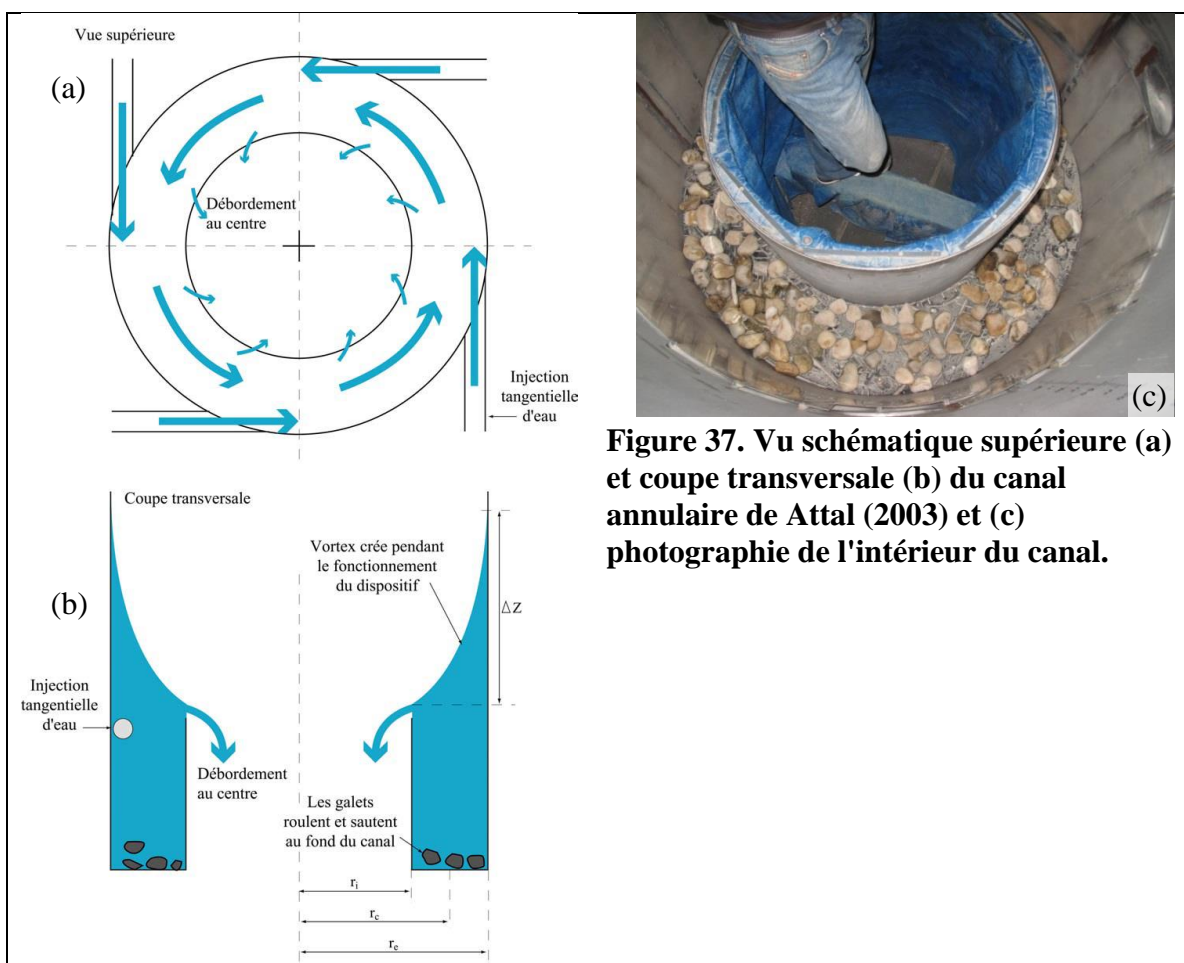


Figure 37. Vu schématique supérieure (a) et coupe transversale (b) du canal annulaire de Attal (2003) et (c) photographie de l'intérieur du canal.

### 2.7.2.3 Processus et facteurs de l'usure des particules

Kuenen (1956) propose de distinguer une demi-douzaine de processus d'usure (Tableau 11): *l'éclatement*, le *broyage*, le *détachement d'éclats*, la *microfracturation*, la *friction*, *l'abrasion par particules en suspension* et l'altération chimique. Il formalise leur importance relative et les conditions de leur développement que l'on trouve dans un tableau



synthétique (Tableau 12) dans Attal (2003). Bradley (1970) propose un processus intermédiaire au broyage et à l'éclatement : *la désintégration granulaire*.

Attal et Lavé (2009) ont complété les observations de Kuenen dans une étude sur les taux d'abrasion de différentes lithologies. Il y est notamment fait état de :

- la dominance des processus d'attrition (*crushing + cracking + grinding*) à faible vitesse et de ceux de fragmentation (*splitting* ou *breaking + chipping*) à vitesses plus élevées ;
- la fragmentation considérée comme un processus très stochastique, favorisée par les discontinuités (fractures, plan de stratification, schistosité ou foliation) dans la structure des particules, qui est dépendant de l'état « initial » des particules et de leur taille puisqu'elle conditionne l'énergie cinétique des particules au moment des impacts
- des variations du taux d'abrasion de l'ordre 500 entre des grès (50%/km) et des quartzites (0.1%/km) soumis à des conditions d'expérimentation égales ;
- les taux d'abrasion sont dépendants des phases de transport donc de l'intensité des crues (les observations de Chen et Stephenson (2015) soulignent la dépendance des taux d'érosion, observés sur des galets de plage, avec la puissance des vagues et corroborent les observations de Attal et Lavé (2009)) ;
- la lithologie est le facteur de contrôle majeur de l'usure des particules :
  - elle contraint les taux d'attrition,
  - elle règle la part de masse perdue par attrition et par fragmentation ;

Processus	Description	Fond sableux	Fond graveleux	Plaine d'inondation
<b>Éclatement *</b>	La particule mère rompt en 2 ou 3 morceaux de taille équivalente		Très rare **	Occasionnel (gel, chimie)
<b>Désintégration granulaire ***</b>	La désagrégation grain par grain suivant les limites entre matériaux, les plans de clivage et microfractures		Potentiellement majeur si lithologie granitique	Clairement favorisée par l'altération
<b>Broyage (crushing)</b>	La particule se brise en d'innombrables particules fines		De petits grains entre de plus gros grains	
<b>Détachement d'éclats (chipping)</b>	De petits éclats se détachent au niveau des angles de la particule	Mineur pendant les 1 <sup>er</sup> s kilomètres puis rare	Dominant dans la 1 <sup>ère</sup> dizaine de kilomètres puis rare	Insignifiant
<b>Microfracturation (cracking)</b>	La microfracturation produit de microscopiques fractures en surface et dans les cônes de percussions sous l'effet des impacts (les produits la microfracturation sont individualisés mais restent en contact en place) ;		Mineur	
<b>Friction (grinding)</b>	la friction pour laquelle les particules fines jouent le rôle d'abrasif	Majeur	Mineur ****	
<b>Érosion par particules en suspension (sandblasting)</b>	Des particules en suspension viennent percuter les particules immobiles (Kuenen, 1955) ;	Insignifiant	Mineur et seulement à hautes vitesses	
<b>Action Chimique</b>		Faible (concerne surtout les calcaires)	Faible (concerne surtout les calcaires)	Important
<p>* : Kuenen pense que l'éclatement est tout à fait marginal en rivière  ** : (Attal et Lavé, 2009) soulignent qu'il est litho dépendant et surtout non-négligeable.  *** : La désintégration granulaire est un processus décrit plus tard par Bradley (1970)  **** : Schumm et Stevens (1973) suggèrent au contraire que les mouvements vibratoires verticaux peuvent engendrer une érosion par friction dans les lits graveleux qui pourrait expliquer les taux d'abrasion obtenus en laboratoire et jugés trop faibles par rapport aux observations de terrain.</p>				

**Tableau 11. Les processus d'érosion des particules sédimentaires et leur occurrence selon différentes unités du système fluvial (adapté d'après Attal (2003) et Kuenen (1956))**

<b>Facteurs</b>	<b>Influence(s)</b>	<b>Explication(s)</b>
<b>Masse</b>	importante sur fond à galets faible sur fond sableux	À vitesse égales de transport, les grosses particules, plus lourdes, ont une énergie cinétique plus importante et s'érodent plus vite.
<b>Vitesse</b>	faible sur galets moyens à larges important sur les petits galets	À vitesses d'entraînement égales, les petits galets vont plus vite et s'érodent plus rapidement.
<b>Lithologie</b>	Majeure: Silex = <u>très résistants</u> Quartz, quartzite,... = <u>résistants</u> Grauwacke, roches plutoniques et volcanique denses, calcaire = <u>moins résistants</u> Grès, lave, gneiss, schiste = <u>peu résistants</u>	Les différences de cohésion, de dureté et de fragilité entre ces matériaux constituent un facteur majeur de leur érosion au cours du charriage
<b>Émoussé</b>	Importante dans les premiers kilomètres parcours	Les angles et les parties convexes sont plus exposés aux impacts que les parties concaves Les particules anguleuses s'érodent plus vite que les particules émoussées *
<b>Forme</b>	Faible mais conditionne forme finale de la particule	L'érosion n'a pas réellement de dépendance à la forme mais à l'inverse la forme selon la lithologie de la particule peut être sensible aux conditions d'érosion
<b>Lit</b>	Sableux : faible érosion Graveleux : forte érosion réduite toutefois de 10 à 15% avec l'ajout de sable	

\* également observé sur une plage par un suivi de traceurs (Bertoni *et al.*, 2016)

**Tableau 12. Facteurs dirigeant l'érosion des particules sédimentaires (adapté d'après Kuenen (1956) et Attal (2003))**

#### 2.7.2.4 Les approches théoriques et les modèles

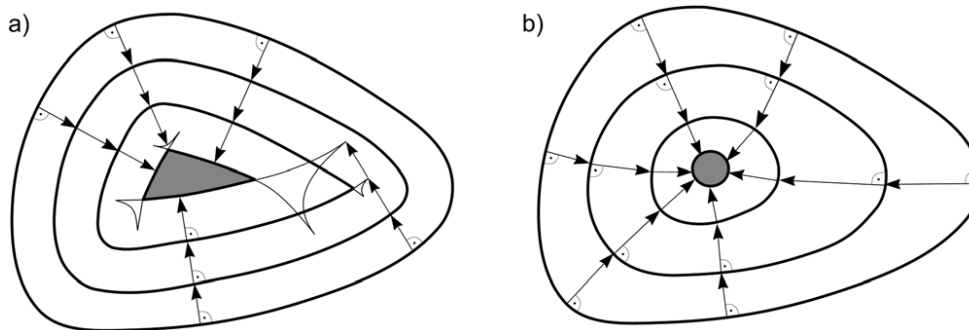
Les approches théoriques modélisent l'évolution de la forme de particules types sous l'effet de processus isolés. On distingue les travaux :

- négligeant la fragmentation et focalisés sur l'attrition, (*e.g. chipping et sandblasting* ; Durian *et al.*, 2006, 2008; Krapivsky et Redner, 2007; Domokos et Gibbons, 2012; Domokos *et al.*, 2014) et ses effet sur les particules ;

- ou, à l'inverse, sur la prédiction des propriétés géométriques des particules issues de la seule fragmentation des particules « mères » constituées d'un matériel homogène (Domokos *et al.*, 2015).

Ces travaux suggèrent :

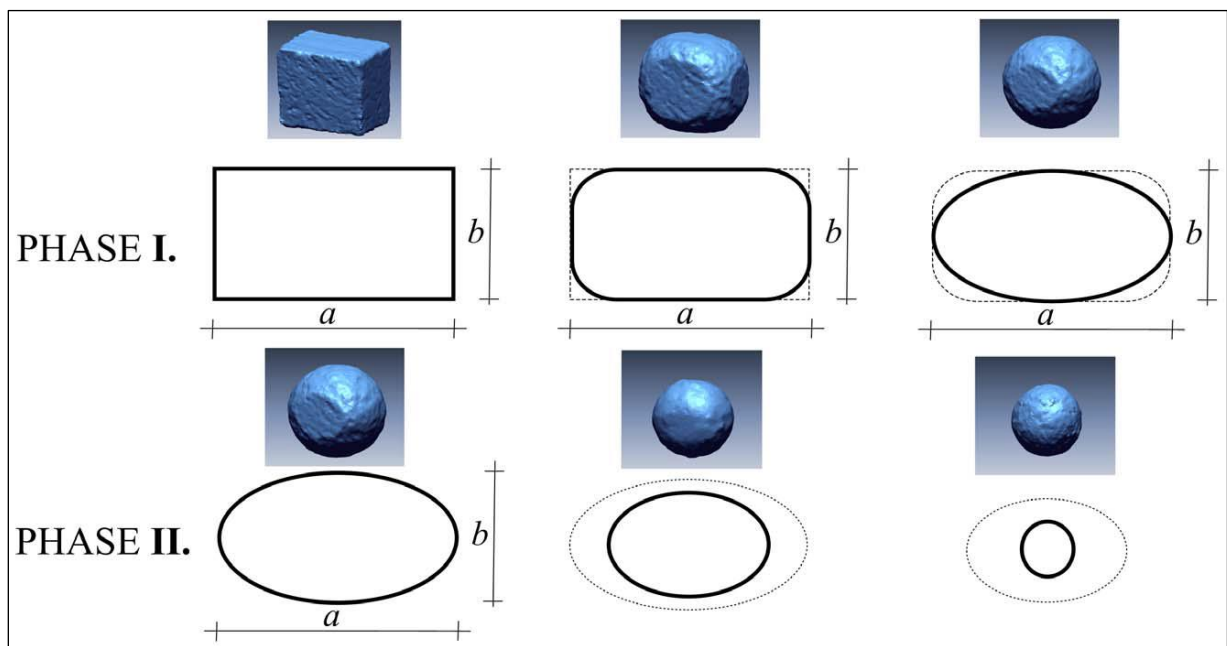
- que le rapport de taille ( $r/R$ ) entre particules abrasives ( $r$ ) et érodées ( $R$ ) conditionne la trajectoire d'évolution de la forme de la particule érodée (Figure 38. Domokos et Gibbons, 2012, 2013):
  - si  $r/R$  est **petit** (e.g. *sandblasting*), la particule tendra vers une forme aplatie
  - si  $r/R$  est **grand** (e.g. sur *bed rock* ou lit graveleux), la particule tendra vers une forme sphérique



**Figure 38. Illustration de l'évolution d'une forme en deux dimensions d'une particule sédimentaire pour un petit (a) ou grand (b) rapport  $r/R$  (Szabó *et al.*, 2013).**

- que la trajectoire de la géométrie d'une particule vers une forme aplatie lorsqu'elle est soumise au processus de *sandblasting* (Dobkins et Folk, 1970), prédite par le modèle de Domokos et Gibbons (2012), est confirmée sur le terrain (Szabó *et al.*, 2013).
- qu'une particule soumise au seul processus de *chipping* tendra vers une forme sphérique (ou circulaire en 2D), sans jamais atteindre la sphère (ou disque en 2D) parfaite (Durian *et al.*, 2006), selon une trajectoire en deux phases (Figure 39. Domokos *et al.*, 2014) :
  - Lors de la première phase, il y a érosion des angles sans réduction des dimensions (axes  $a$  et  $b$ ) de la particule jusqu'à ce qu'elle atteigne l'aspect d'une ellipse. Les indices d'émoussé utilisés (convexité et indice d'émoussé de Wadell (1932)) par les auteurs croissent alors très rapidement (Domokos *et al.*, 2014).
  - Puis, au cours de la seconde phase, l'érosion réduit progressivement l'ellipse qui tend vers la forme d'une sphère et voit ses axes  $a$  et  $b$  diminuer. Les indices d'émoussé tendent alors vers une asymptote (Domokos *et al.*, 2014).

- La fragmentation d'une particule « parente » constituée d'un matériel homogène, s'opère le long d'un plan qui comprend le centre de gravité de la particule. Elle produit des particules « filles » dont les poids et les formes suivent une loi puissance asymptotique, dans laquelle les petits fragments présentent une forme équidimensionnelle tandis que les grands fragments présentent une forme anisotropique (Domokos *et al.*, 2015). Les auteurs suggèrent également que cette loi est valable que la fragmentation soit provoquée par un coup de marteau sur la particule « mère », par son explosion ou sa météorisation et de quelle que soit la lithologie de la particule « mère » (du moment qu'il s'agit d'un matériel homogène).



**Figure 39. Illustration des deux phases d'abrasion par attrition d'une particule sédimentaire (Domokos *et al.*, 2014).**

### 1.3.7.3 Synthèse sur l'effet du transport solide sur les particules sédimentaires

Le transport solide agit sur les particules sédimentaires composant la charge de fond en transit au travers de deux leviers :

- Le transport sélectif des particules fonction :
  - de leur taille (mobilisation préférentielle des plus petites particules),
  - ou de leur forme (selon la rugosité du lit notamment, certaines formes sont préférentiellement mobilisées et transportées).
- L'érosion ou l'usure des particules transforme leurs propriétés géométriques (forme et émoussé) par l'intermédiaire de divers processus, parmi lesquels on peut opposer l'attrition et la fragmentation. L'occurrence et l'intensité de ces processus adoptent un caractère stochastique au sein d'un système complexe articulant condition d'écoulement, lithologie, ou encore environnement abrasif (fond rocheux, graveleux, sableux).

Ces deux phénomènes sont abordés de manière indépendante, voire concurrente alors que de récents travaux (Jerolmack *et al.*, 2011) suggèrent que, dans des conditions de transport éolien, ils sont non seulement co-occurents, mais surtout dépendants l'un de l'autre : la mobilité des particules contrôle les taux d'abrasion qui modifient les caractéristiques des particules, et par ces intermédiaires, influencent à leur tour la mobilité des particules. Toutefois, cette rétroaction possible n'a pas encore été étudiée en milieu fluvial. Aussi la transformation de la charge de fond et des particules sédimentaires est appréhendée par des approches, relativement antagonistes, quoique très complémentaires (empirique, modélisatrice ou encore étude de cas) et qui partagent des outils communs (mesures de l'abrasion, de la forme ou de l'émoussé des particules).

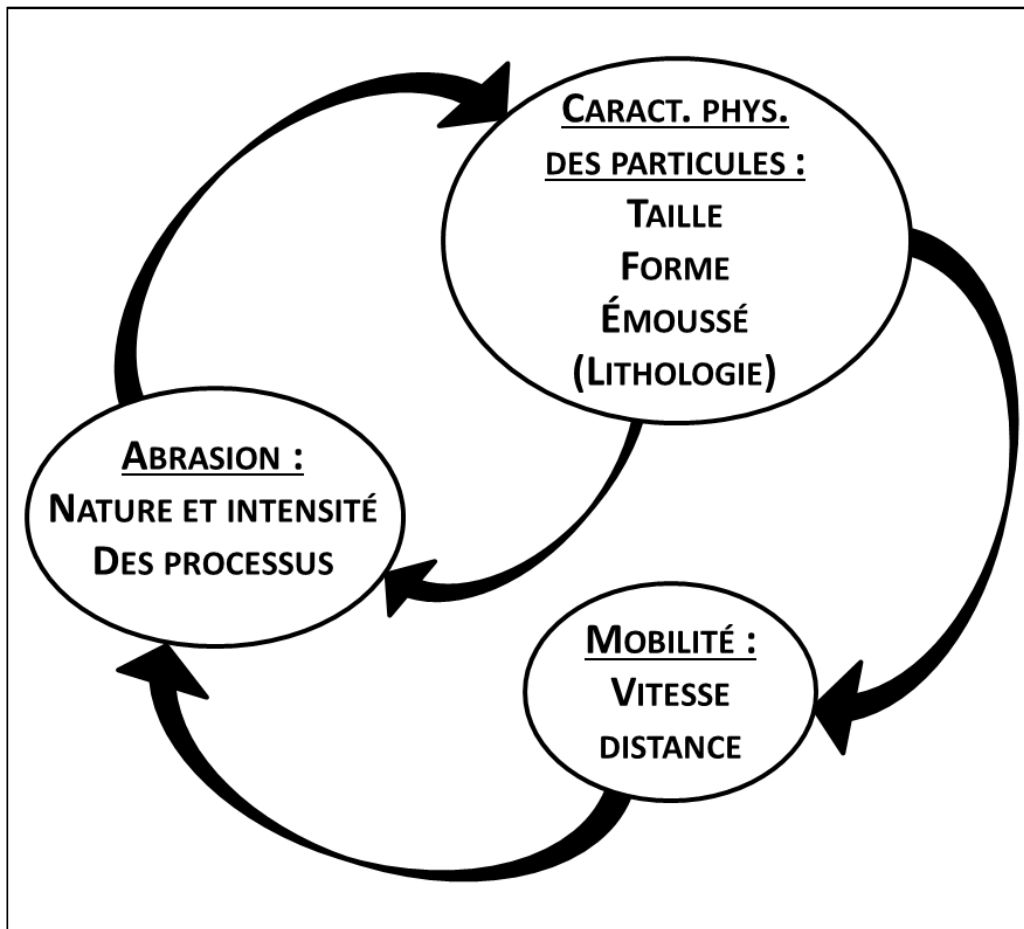
## 1.4 PROBLÉMATIQUES DE RECHERCHE

Dans les premières parties de cette introduction, nous avons vu que les processus du transport de la charge sédimentaire occupent un rôle central dans la structuration des paysages fluviaux, dans leur bon fonctionnement hydrosédimentaire et contribuent à la pérennité de leur bon état écologique. L'étude du transport solide constitue également une problématique centrale aussi bien pour les sédimentologues, les ingénieurs hydrauliciens, les géomorphologues, que pour les gestionnaires d'ouvrages d'hydroélectricité, les concessionnaires de grands cours d'eau ou les organismes de gestion et de prévention des risques liés aux cours d'eau. Nous avons abordé les différents angles de vue adoptés pour caractériser la charge sédimentaire grossière, les processus clés qui régissent son transport et les phénomènes physiques qu'ils génèrent.

Dans cette partie, en nous appuyant sur les éléments précédemment définis, nous allons poser les problématiques de recherche qui ont guidé ce travail de thèse. Pour cela, il me faut d'emblée affirmer l'aspect méthodologique ou technique commun à ces problématiques qui reposent sur le développement et le test de nouveaux outils et/ou la validation d'outils existants. Ces problématiques ont parfois muté, ou ont émergé de développements achevés en cours de thèse constituant des opportunités scientifiques à saisir. Et c'est pourquoi, il m'est apparu pertinent de les exposer ci-dessous dans une certaine chronologie.

Avant d'aborder ces problématiques, il convient de définir, non plus le large cadre thématique, mais un cadre scientifique plus restreint touchant strictement à la fraction grossière de la charge sédimentaire. Ce cadre scientifique peut-être représenté comme un triptyque dans lequel s'enchâssent nos problématiques et qui est défini par les trois éléments suivants (Figure 40) :

- les caractéristiques physiques des particules,
- la mobilité de ces particules,
- et la transformation par abrasion de ces particules.



**Figure 40. Interrelations entre les éléments du triptyque thématique de la thèse touchant aux particules sédimentaires grossières.**

Ces éléments présentent des relations de dépendance puisque :

- les caractéristiques physiques des particules (taille, forme, émoussé et lithologie) influencent leur mobilité et, toutes choses étant égales par ailleurs, l'émoussé et la lithologie influencent l'intensité et la nature des processus d'abrasion,
- la mobilité des particules (vitesse et distance) influence la nature et l'intensité des processus d'abrasion,
- et les processus d'abrasion (attrition vs fragmentation) affectent les caractéristiques géométriques des particules.

Chronologiquement, la réflexion débute avec le constat des faibles taux de retour des PIT tags injectés dans l'Ain (Piégay *et al.*, 2016). Nous avons étudié le rôle potentiel, et négligé jusque-là, de la fracture des traceurs dans ces faibles taux de retour. Pour cela nous avons conçu une expérience dans le canal annulaire conçu par Attal (2003) que nous avons équipé d'une antenne pour la détection de PIT tag afin de comparer l'érosion de particules calcaires de l'Ain et de particules synthétiques, certaines équipées de PIT tag, en fonction de la distance parcourue (MS1). Dans ce travail, il y est question de mobilité et d'érosion des



particules, ainsi que de l'effet de la mise en place selon différentes techniques de PIT tag sur des particules naturelles ou synthétiques.

Les enseignements de cette première expérience ((1) la fracture des galets calcaires ne permet pas d'expliquer les faibles taux de retour observés sur l'Ain, (2) l'antenne et les PIT tags permettent un suivi des distances et vitesses de transport des particules équipées dans le canal annulaire et (3) l'absence de fracturation pendant le charriage des galets synthétiques que nous avons conçus en fait une solution particulièrement intéressante dans l'optique de produire de nouveaux traceurs sédimentaires) nous ont encouragé à :

- tester les capacités de détection de nouveaux transpondeurs immergés et enfouis afin de développer une nouvelle méthode de traçage des sédiments grossiers en rivière qui permette de dépasser les limites des PIT-tags (trop courte distance de détection, collision des signaux) et d'augmenter les taux de retour de traceurs injectés. Ce travail (**MS2**) aborde donc exclusivement la composante mobilité du triptyque ;
- concevoir une expérience de suivis de l'évolution de l'éroulé de particules sédimentaires grossières dans le canal annulaire en fonction de la distance qu'elles y parcourent grâce au programme de Roussillon *et al.*, (2009; Roussillon (2006)) après avoir testé la sensibilité de ce programme et des résultats qu'il produit (1) au nombre de galets constituant un échantillon, (2) à la position des galets sur la plaque rouge, (3) à la résolution des photographies ou (4) encore à des traitements de retouche des photographies. Cette étude (**MS3**) est axée sur trois composantes du triptyque : une analyse de l'interaction entre mobilité, abrasion et éroulé des particules ;
- Et enfin, à la suite d'améliorations apportées à notre processus de conception des galets synthétiques (améliorations portant à la fois sur la qualité et la facilité du moulage ainsi que sur la maîtrise de la densité des galets), nous avons réalisé une expérience comparant les influences respectives de la forme et de la densité des particules sédimentaires synthétiques sur leur mobilité par charriage dans le canal annulaire. Cette dernière étude (**MS4**) est donc axée sur les propriétés géométriques et la mobilité des particules sédimentaires.

## **CHAPITRE 2 : EFFET DU TRANSPORT ET DE L'INSERTION DE TRANSPONDEURS D'IDENTIFICATION PAR RADIO FRÉQUENCE SUR LA RÉSISTANCE ET LA FORME DE GALETS NATURELS ET SYNTHÉTIQUES : APPLICATION POUR TRAÇAGE SÉDIMENTAIRE DE CHARGE GROSSIÈRE EN MILIEU FLUVIAUX ET COSTAUX.**

### **Article numéro 1 :**

Cassel M, Piégay H, Lavé J. 2016. *“Effects of transport and insertion of radio frequency identification (rfid) transponders on resistance and shape of natural and synthetic pebbles: applications for riverine et coastal bedload tracking”*. Earth Surface Processes and Landforms: DOI: 10.1002/esp.3989

**Abstract:** RFID transponders, especially low-frequency Passive Integrated Transponders (PIT tags), are now commonly used for assessing bedload mobility in gravel-bed rivers. Early studies reported high PIT tag recovery rates in small streams, but recovery rates in larger systems remain low. Explanatory factors for low recovery rates have been identified, but only antenna detection ranges and clustering effects have been precisely characterized. Burial below detection limit and dispersion beyond the study site have been indirectly estimated, and PIT tag destruction is assumed to be negligible. In this study, we quantified the resistance of natural limestone pebbles equipped with PIT tags as related to tag insertion methods and distance travelled in an annular flume. We then compared the performance of these natural pebbles with synthetic pebbles made of polyurethane resin and corundum. Creation of synthetic pebbles makes it possible to test bigger transponders with a greater detection range and no clustering effects, bypassing the existing constraints of RFID tracking. We found that breakage of limestone particles leading to PIT tag destruction is far too rare to explain low recovery rates in situ. Further breakage is more affected by initial pebble characteristics than by PIT tag insertion method. Synthetic pebbles are more sensitive to attrition, but less likely to break. Natural and synthetic pebbles show slight differences in mobility patterns, transport distances, and abrasion resistances. One of the two synthetic pebbles travelled faster than the others three indicating that mobility is not only related to density but also potentially to shape. To address clustering and detection range issues, we equipped synthetic pebbles with AIT-tags (Active Integrated Transponders). These were tested for integrity and transponder endurance and show great promise for future applications.

**Key-words:** Particle tracking, RFID, density, distance of travel, bedload transport, PIT tag.

## 2.1 INTRODUCTION

Bedload transport is a key mass transfer process on the Earth surface, in particular in alluvial settings. Despite decades of studies, data on bedload transport as well as on bedload fluxes remain relatively sparse, mostly because of challenges associated with field experimentation and due to tracer equipment constraints and/or high costs. Recently, the use of PIT tags inserted into individual pebbles has led to new strategies for quantifying bedload transport. Individual particles may now be tracked and used to quantify timing and distances as bedload transport occurs (Olinde and Johnson, 2015). Tagged particles may also be used to understand the influence of critical physical drivers such as the particle mass and shape in entrainment thresholds and traveled distances (Schmidt and Gintz, 1995; Sear *and al.*, 2008), to monitor the effectiveness of restoration measures (Kloesch *and al.*, 2008; MacVicar *and al.*, 2015), to compare models of tracer travel distance distributions (Chapuis *and al.*, 2014), or to calibrate numerical models of particle paths (Liedermann *and al.*, 2013).

PIT tags are a type of RFID (Radio Frequency Identification) transponder, which communicates to a reader through an antenna by radio frequencies. The term RFID refers to both active and passive types of tags, PIT tags falling within the latter category. Their low cost, long operating life and unique identification codes make them an important tool for measurement of particle mobility. Usually, low-frequency PIT tags are used for particle-tracking in rivers (Nichols, 2004; Lamarre *et al.*, 2005; Rollet, 2007; Lamarre and Roy, 2008b; Camenen *et al.*, 2010; Schneider *et al.*, 2010; Arnaud, 2012; Chapuis, 2012; Houbrechts *et al.*, 2012; Liébault *et al.*, 2012) and in coastal environments (Allan *et al.*, 2006; Benelli *et al.*, 2009, 2011)

Early fluvial studies in small and shallow rivers report high recovery rates (>87%) for tracked particles (Nichols, 2004; Lamarre *et al.*, 2005; Nathan Bradley et Tucker, 2012). But, when these PIT tags were deployed in very active or large rivers, recovery rates were found to be much lower : <50% (Rollet, 2007; Camenen *et al.*, 2010; Arnaud, 2012; Liébault *et al.*, 2012; Milan, 2013; Chapuis *et al.*, 2015), see table 1 Chapuis *et al.* (2014) and table 2 in Chapuis *et al.* (2015) for details). Such a high loss ratio represents a major drawback when trying to interpret the distribution of recorded variables from the tagged pebble population, and it limits the applicability of this technology for studies that span long time periods and/or long travel distances.

Five explanatory factors for low recovery rates have been identified thus far (Lamarre *et al.*, 2005 ; Liébault *et al.*, 2012): (I) burial in sediment bars deeper than the detection limit,

(II) incomplete channel surveys, (III) dispersion beyond the study site, (IV) interference, signal collision or clustering due to other transponders in close proximity, and (V) PIT tag destruction by pebble fracturing during transport. Solutions to limit particle signal collision (factor IV above) and particle abrasion and destruction or dysfunction of PIT tags (factor V) have not yet been found, although some authors make recommendations to provide better protection and shock absorption for the tags (Allan *et al.*, 2006).

Most recent studies have investigated factors influencing maximum detection distance and, in particular, maximum burial depth (Chapuis *et al.*, 2014; Arnaud *et al.*, 2015), and have experimented with technical specifications of large antennas to improve survey efficiencies for large channel and bar areas (Arnaud *et al.*, 2015).

The use of active, radio transmitters rather than passive transponders has also been explored. These types of active RFID tags are equipped with batteries and external antenna, and are usually fairly large and heavy (e.g., ATS #F1855 transmitters are approximately 8.5 cm long, 3.5 cm in diameter, with a 34 cm external antenna as shown on fig. 2c in MacVicar *et al.* 2009). They generate a more powerful, very high frequency signal, which can be more widely detected compared to passive transponders one. However, few studies have used them for sediment tracking (Schmidt and Ergenzinger, 1992 ; Habersack, 2001; Ergenzinger *et al.*, 1989 and Chacho *et al.*, 1989 in Kondolf and Piégay, (2003) ; McNamara and Borden, 2004; Liedermann *et al.*, 2013) because they remain costly and also exhibit collision effects (Ergenzinger *et al.*, 2003). Therefore, they cannot be applied to large numbers of pebbles. Such large sample size is often necessary to provide a reliable average value of particle mobility in surveys of pebble movements during floods (Arnaud, 2012). Furthermore, methodology and techniques applied (e.g., transmitter detection ranges and approaches to calculate tracer positions or movements based on radio signal) are usually not fully detailed in scientific contributions, so that it is still difficult to really assess potential benefits and constraints in different operational contexts.

Alternatively, active, ultra-high frequency transponders (a-UHF), which function both as transmitters and responders, may provide another solution for tracking pebbles, which can be, in specific contexts, better than the previous one, because of their properties. Ultra-high frequency transponders do not interfere with each other, are cheaper, lighter and exhibit longer operating lives than radio transmitters. Therefore, they can be widely deployed in large numbers, similarly to PIT tags. However, their larger volume requires them to be inserted into larger natural particles, typically cobbles or boulders. Insertion into pebbles can significantly

modify the pebble density and thereby affect mobility characteristics and potentially alter the resistance of tagged pebbles to fracturing.

One way to address these aforementioned problems when tagging pebbles with active transponders is to mold artificial pebbles around them using synthetic materials. Synthetic pebbles must satisfy several criteria in order to provide accurate natural bedload transport data. Synthetic pebbles should (I) reproduce natural pebbles' properties (sizes, forms, densities) and thus behavior during bedload transport, (II) not disturb the high-frequency tag signal to maintain easy detection, and (III) present equivalent or lower sensitivity to abrasion and fracturing than natural rock. To meet these criteria, synthetic pebble properties need to be rigorously tested and compared to natural pebbles. Several authors created synthetic particles from mixtures of concrete or/and plastic (Maniatis *et al.*, 2013), sometimes with barytes, fiberglass or resin (Sear *et al.*, 2008), or with lead balls and resin (Liedermann *et al.*, 2013). Some of these particles have been equipped with magnetic cores (Schmidt et Gintz, 1995), radio transmitters (Kloesch *et al.*, 2008 ; Liedermann *et al.*, 2013), 32-mm or 23-mm long PIT tags (Nichols, 2004 ; Olinde *et al.*, 2012), or 30-mm RFID discs and accelerometers (Olinde *et al.*, 2012). But, only a few tests have been conducted to compare natural and synthetic pebble characteristics such as density, and no study has yet compared sensitivity to abrasion and fracture with natural rock.

In order to improve techniques for tracking pebbles and to better understand low recovery rates in larger rivers, this study explored the sensitivity to fracturing during transport of natural and synthetic pebbles equipped with both passive and active transponders. To do this, we ran experimental tests in a circular flume under controlled flow conditions, and then measured pebble abrasion by sieving and weighing eroded material (Attal *et al.*, 2006; Attal and Lavé, 2009). Transponder loss during transport was tracked according to pebble type, RFID transponder type, and mode of insertion within particles. Differences in particle mobility and travel distance induced by differences in density were also quantified.

## **2.2 MATERIALS AND METHODS**

### **2.2.1 RFID transponders used**

Three RFID transponder types were tested to determine their resistance during bedload transport: (1) TIRIS PIT tags (so called PIT tags), (2) RF Code transponders and (3) ELA transponders (see Table Tableau 13 for transponder details). The latter two are active, Ultra

High Frequency (UHF) tags, as opposed to the low-frequency TIRIS PIT tags. Manufacturers of these UHF tags assure a maximal detection range of  $\approx 90$  m in open field conditions.

**Table 1: General characteristics of the transponders used in this study.**

<b>Producer</b>	<b>TIRIS Technology</b>	<b>RF CODE Inc.</b>	<b>ELA Innovation SA</b>
Distributor	Texas Instruments	Various companies	CIPAM company
Model	RI-TRP-RR2B	M100	COIN ID
Abbreviation used	TIRIS	RF Code	ELA
Signal Frequency	134.2 kHz	433.9 MHz	433.9 MHz
Passive or Active	Passive	Active	Active
Max. detection range (m)*	1	91	80
Volume (cm <sup>3</sup> )**	0.372	18.714	6.330
Mass (g)***	0.8	14	11
Calculated density (g.cm <sup>-3</sup> )	2.15	0.75	1.74

Note: \* specified by manufacturer in open field; \*\* calculated with manufacturer information; \*\*\* specified by manufacturer.

### **Tableau 13. Caractéristiques générales des transpondeurs utilisées.**

Each TIRIS PIT tag is 32 mm long with a maximal detection range of 0.95 meters when using a rectangular-shaped antenna (Arnaud *et al.*, 2015). The reader used is distributed by the CIPAM Company (see Arnaud *et al.* (2015) for all component details). Only TIRIS tags were used to track particle velocity during the first set of experiments, whereas active transponders were introduced in the second set of abrasion experiments to test their functionality after alluvial transport.

The first type of active transponder, here called “RF Code”, is made by RF Code Inc. This M100 Asset Tag model has already been used for riverine wood tracking (MacVicar *et al.*, 2009; Schenk *et al.*, 2014 ; Ravazzolo *et al.*, 2015). Transponder signals are detected by a mobile reader M220 connected to a numerical tablet with “Mobile Track Lite” software.

The second type of active transponder, here called “ELA”, is the model COIN ID, made by ELA Innovation SA. Its main advantages are its shock-resistance and waterproof case as well as its relatively small size (diameter = 40 mm) and volume (6.3 cm<sup>3</sup>) compared to other active tags. To date, we have conducted encouraging tests using these tags in small lakes and in a gravel quarry. They demonstrate a detection range of about 2.5 meters underwater and 2.6 meters under a sediment layer of saturated gravel and sand.

#### **2.2.2 Pebble preparation**

We collected 75 kilograms of limestone pebbles from the lower Ain River (France), whose b-axis ranged from 45 to 64 mm (sieved in the field with square-holed templates for efficiency and lower measurements errors (Bunte and Apt, 2001)). Thousands of pebbles with

b-axis in this range equipped with TIRIS PIT tags have been deployed in this river over the past decades (Rollet, 2007; Alber, 2012), more recently by Arnaud (personal communication) who released 1500 equipped pebbles. The relatively low detection, or recovery rates ranging from 25 to 36% depending on the survey (Rollet *et al.*, 2008) represent one of the incentives for experimentally testing this limestone material. Indeed, because breaking of these limestones has not been documented yet, it is suspected to be a factor for low recovery rates observed and future recommendations may improve tracking on this site. From the 75 kilograms of limestone pebbles, we then randomly selected 90 pebbles into which we inserted TIRIS PIT tags. The rest of the 75 kg pebbles collected was used for comparison between equipped and unequipped pebbles.

#### *2.2.2.1 TIRIS PIT tag insertion in natural pebbles*

Three groups of 30 tracers were prepared with three TIRIS tag insertion positions in limestone pebbles according to their *a*-, *b*- and *c*-axes, which are the long, the intermediate and the short axes, respectively:

- within a hole drilled in the a-axis using a drill press;
- within a hole drilled in the b-axis using a drill press;
- within a notch cut with a grinding wheel on the pebble surface along the a-axis

(Houbrechts *et al.*, 2012; Liébault *et al.*, 2012);

Each hole was refilled with epoxy resin after TIRIS tag insertion.

The first insertion method is the most common for small pebbles (b-axis less than 32 mm) because the a-axis is the only one long enough to encase a 32-mm long tag.

While drilling along the c-axis is recommended for maximizing the detection distance (Arnaud *et al.*, 2015), we chose to drill along the b-axis in this experiment. In our pebble set, there was greater variability in b-axis lengths than c-axis lengths, allowing us to better investigate the ratio of TIRIS PIT tag length to the drilled pebble axis length as a potential critical factor in the resistance test.

The third method, which is usually performed along the a-axis, was developed for soft rocks, such as marly limestone, which tend to break under the impacts of a drill press.

#### *2.2.2.2 Synthetic pebble creation and tag insertion*

##### *Objectives and ingredients*

The three main objectives for the pebble creation process were that it: (1) reproduce natural pebble characteristics (especially density) as well as possible, (2) allows fabrication of several pebbles at a time, and (3) allows us to equip pebbles with different transponder types. Our synthetic pebbles are composed of a mixture of two materials: (1) a two-component polyurethane resin (density  $\approx 1.1$ ) selected for its hardness (75-80 on Shore hardness scale) and its short drying time, and (2) corundum, selected for its density (3.9-4.1), hardness (9/10 on Mohs's scale), and non-magnetic properties in order to avoid any disturbance to the transponders' radio wave communications.

#### *Pebble creation process*

To begin, a dozen natural limestone pebbles were selected that were representative of average characteristics of the entire sample in terms of mass, size, and shape. Then, three of these were chosen from which to make models, based on their simple shapes being more easily extracted from the mold (see A10, B5 and B24 in Tableau 14). The densities of these pebbles were used as references to calculate proportions of corundum and polyurethane resin to use in the mixture for the synthetic pebbles. In theory, the mass proportions to reach a mixture density of 2.65 are around 82% and 18% for corundum and polyurethane resin, respectively.

**Table 2: Physical characteristics of the three limestone pebbles used as models to design the mold (a) and the four pebbles used in transport distance runs (b).**

Pebble ID	Volume (cm <sup>3</sup> )	Mass (grams)	Density (g.cm-3)	a-axis (mm)	b-axis (mm)	c-axis (mm)	Sphericity *
A10 (a)	117	319	2.70	85	69	43	0.93
B5 (a)	117	305	2.60	87	60	46	0.95
B24 (a)	86	226	2.60	94	58	31	0.85
SYNT1 (b)	123	265	2.15	90	68	42	0.92
SYNT2 (b)	147	326	2.22	90	73	49	0.95
LIMS1 (b)	146	388	2.66	89	73	47	0.94
LIMS2 (b)	111	297	2.67	84	69	39	0.91

Note: \* ratio between volume of the pebble calculated from the *a*, *b* and *c*-axes volume and the area of the pebble ellipse calculated with *a* and *b*-axes using Knud Thomsen formula

**Tableau 14. Caractéristiques physiques des (a) galets calcaires modèles pour le moulage et (b) des galets utilisés pour les suivis de mobilité.**

The reusable molds are made of two parts. The first is a silicon membrane, to facilitate unmolding, and the second, a plaster hull, to maintain the original pebble shape. Creating a mold involves two steps: first, a pebble is covered with a fine film of lubricant and entirely coated with silicon. After complete drying (about two days), the silicon membrane is cut into



two parts that match perfectly along the horizontal plane including *a*- and *b*-axes of the pebble. At the end of this first step, the pebble is removed to make sure that it is not stuck to the silicone and then it is put back into the silicone shell for the second step.

In the second step, each half of the silicone-coated pebble is enclosed in plaster hulls of the exactly same dimension. To create this hull, the bottom half of the silicone membrane is adjusted in a formwork and plaster is poured around it. When the plaster is dry enough, a lubricant film is applied over its surface and the second silicone half-membrane is placed back on the pebble, then the second part of the plaster hull is cast. When the second plaster hull is dry (about 24 hours), two holes are drilled in the upper half of the mold: one for mixture injection and a second for air output. During pebble casting, the two parts of the mold are firmly held in place with screw clamps.

To make the synthetic pebble, the two components of the polyurethane resin are mixed in a pail. Then, the white corundum powder ( $D_{50} = 0.154$  mm) is added and the resultant mixture is homogenized with a spatula. The mixture is put in a casting ladle and injected into the molds. Our experiences taught us that the whole operation should never exceed ten minutes. Because the polymerization process starts when the two polyurethane resin components are mixed in the pail, the mixture progressively loses its fluidity. If the operation lasts too long, the mixture can harden in the casting ladle. The molds can be opened 30 minutes after injection. When shape imperfections (such as bubbles or notches along the molding plane) were significant, they were corrected by filling them with mixture plugs to improve their shapes.

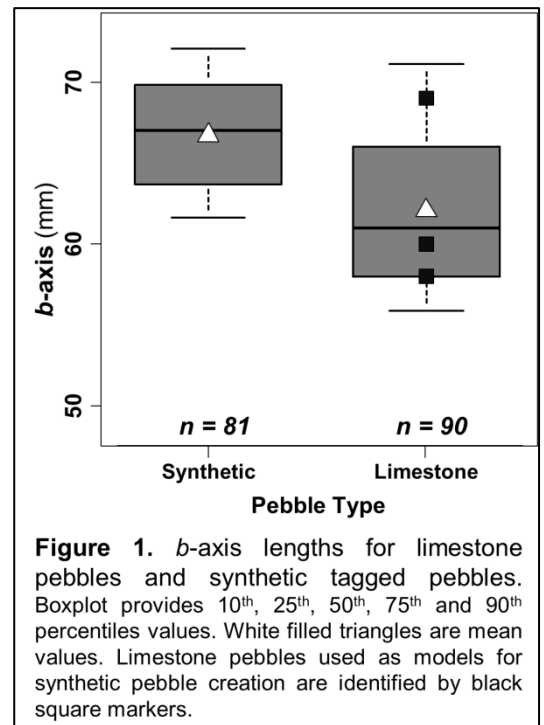
Several production tests were conducted to find the best way to produce the greatest number of pebbles per casting operation and to reduce the loss of material inherent to mixture transfers (from the pail to the casting ladle to the molds). In normal conditions, about six pebbles can be created per operation. In warm conditions, the polymerization process is faster and the mixture hardens faster, so that fewer pebbles can be produced. When the room temperature exceeds  $32^{\circ}\text{C}$ , the casting operation becomes almost impossible. Other factors, such as insertion of voluminous transponders, also decrease the number of pebbles per casting operation. Indeed, while the insertion of TIRIS PIT tags is facilitated by inserting a lubricated nail between the two halves of the mold, the insertion of RF Code or ELA transponders is more laborious. The first difficulty related to insertion of the active transponders is the need to partially cast the lower half of the mold before placing the transponder, then to close the molds and complete the casting. The second difficulty is the need to increase the corundum

proportion, which leads to a decrease in the mixture fluidity and complicates the final part of the casting process.

Thus, we produced 81 synthetic pebbles, 26 of which were equipped with TIRIS PIT tags, 19 with RF Code transponders, 4 with ELA transponders, and 36 without any transponder.

The D10 and D90 of the pebbles (pebble size measured along b-axis) were respectively 62 and 72 mm for synthetic and 56 and 71 mm for limestone pebbles (Figure 41). We measured the volume and the mass of synthetic and limestone pebbles with inserted tags (the tracers) and without. Then we calculated their densities.

**Figure 41. Longueurs des axes b des galets calcaires et synthétiques équipés de transpondeurs.**



**Figure 1.** b-axis lengths for limestone pebbles and synthetic tagged pebbles. Boxplot provides 10<sup>th</sup>, 25<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup>, 75<sup>th</sup> and 90<sup>th</sup> percentiles values. White filled triangles are mean values. Limestone pebbles used as models for synthetic pebble creation are identified by black square markers.

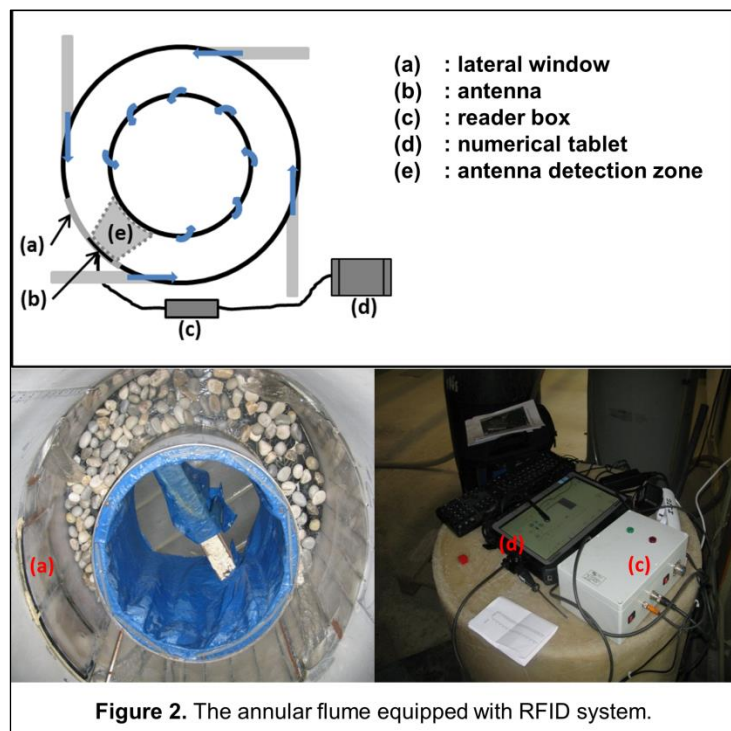
### 2.2.3 Experimental tests in the annular flume

The annular flume, installed in Nancy (France) at the Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, has an external diameter of 1.5 m, a width of 0.3 m, and a depth of 0.6 m. The recirculating device is powered by a 22 kW pump and four pipes that tangentially inject water into the flume (Attal *et al.*, 2006). Flow conditions are set by the functioning frequency of the pump and checked by a flowmeter. The bed of the flume is covered with pieces of tires and its walls with polycarbonate panels, so that only the interactions between pebbles produce abrasive contacts.

The flume is fitted out with TIRIS PIT tag reading equipment (Figure 42) composed of:

- a specially-designed rectangular-shaped antenna;
- an electronic reader (see Arnaud *et al.*, 2015 for details);
- a computer tablet on which the software Comtools was installed.

The antenna was placed next to the lateral window of the flume. We assessed the antenna sensing-field when the flume was at standstill along internal and external sides of the flume and along the mean trajectory curvature radius. We simulated numerous passages of tagged particles sliding and saltating at several velocities. The chosen antenna location allows for detection across the entire channel width for a distance of 0.38 meters (Figure 42). Due to the narrowness of the flume and the antenna placement on the other side of the lateral window, it was not possible to define 3D detection range of this antenna. Furthermore, installation of the antenna on the flume structure decreases the antenna detection range. Thus, 3D detection range assessment for the antenna was not conducted because it was not installed within the flume structure.



**Figure 42.** Le canal annulaire d'Attal (2003) équipé avec le système de lecture des transpondeurs PIT tags.

The tag reader operates in cycles of approximately 0.09 seconds divided into three phases: a charging phase of 0.05 s, a listening/reading phase of 0.02 s, and a synchronization period of 0.02 s (Tsakiris *et al.*, 2015). We predict that the pebbles motion (which changes the TIRIS PIT tag's orientation) and very short cycle time of the reader will preclude TIRIS PIT tag signals collision caused by the clustering of several TIRIS PIT tags within the antenna detection field. We also assume that each pebble's instantaneous speed will not exceed  $2.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . This velocity should allow a TIRIS PIT tag to spend at least two complete reader box cycles within the antenna detection field and thus ensure its unique identification code to be recorded.

The Comtools software was developed by US Digital. This program transmits and receives data from practically any device connected to a PC's COM port. It records time series whose minimum interval can be fixed by the user. Here, we used it to automatically record the signals transmitted by the reader box. The recording interval was configured so that the software is synchronized with the cycles of the reader. The signal recorded is either blank when no TIRIS PIT tag is within the detection field or it contains the identification code of the TIRIS PIT tag present.

Thus, it allows us to automatically record the time taken by pebbles to complete each lap around the flume. We assume a distance per lap corresponding to that covered by a pebble following the mean trajectory curvature radius. This corresponds to a distance per lap of 3.77 meters (Attal *et al.*, 2006). We calculate the cumulative distance traveled by each pebble according to time by using the number of laps completed and the time per lap.

Two sets of experiments were conducted. The first set of experiments was dedicated to document pebble velocity, travel distance, and mobility patterns. The second set was designed to explore the impact of transport on abrasion and fracturing of the pebbles.

#### *2.2.3.1 Pebble mobility measurements*

The first set of experiments comprised three runs with 70 kg of limestone pebbles, whose b-axis ranged from 45 to 64 mm, with between two and four tagged pebbles added per run to assess distance of transport (see Tableau 15 for the description of these three experiments and Table 2 for the description of the pebbles used). TIRIS PIT tag signal collision was avoided by limiting the number of equipped particles in the flume. Only one tagged pebble was present within the flume at the start of the first run. Once the system was properly stable and operating, we added a second tagged pebble and ensured that no signal shadowing was observed when both tagged pebbles were passing in front of the antenna close to each other. Next, two runs were performed with the same 70 kg of limestone pebbles, plus two synthetic tagged pebbles and two tagged limestone pebbles, in order to measure lap time and number of completed laps by different pebbles at two discharges (215 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> and 240 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>). We selected these two discharges, because they correspond to a mean flow velocity calculated from vortex size (Attal and Lavé, 2009) of about 1.4 m.s<sup>-1</sup> and 1.5 m.s<sup>-1</sup> respectively, reproducing bedload transport conditions typical in our studied fluvial environments. Habersack (2001) observed particle movements in rivers at speeds not exceeding 2 m.s<sup>-1</sup> which exhibited alternations of rapid motion and rest periods.

**Table 3: Characteristics of the two sets of experiments.**

Test Run	Distance measurement runs				Abrasion experiment runs			
	Run 1	Run 2	Run 3	Initial state	S1	S2	S3	S4
Duration (minutes)	30	30	30	X	30	60	30	60
Discharge set at the pump (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	215	215	240	X	215	215	240	240
Synthetic tagged (n)	2	2	2	26/19*	26/19*	26/19*	26/19*	26/19*
Limestone tagged (n)	0	2	2	30/30/3 0**	30/30/3 0**	30/28/3 0**	30/28/3 0**	30/28/3 0**
Synthetic (tagged) (kg)	X	X	X	22.2	22.2***	22***	21.9***	21.7***
Limestone (tagged) (kg)	X	X	X	27.6	27.4***	26.8***	26.7***	26.6***
Limestone (untagged) (kg)	70	70	70	21.4	21.4***	19.9***	19.8***	19.7***

Note: \* PIT tags/Active tags; \*\* Inserted along a-axis/Inserted along b-axis/notched; \*\*\* Weighed after the abrasion sequence; (n): number of pebbles.

**Tableau 15. Descriptifs des deux sets d'expériences.**

### 2.2.3.2 Assessment of attrition and fragmentation.

The second set of experiments was composed of four runs conducted under the same discharge conditions and pebble characteristics (total sample mass and b-axis lengths), including tagged synthetic and limestone pebbles (see Table 3). Due to the large number of TIRIS PIT tags in the flume (n = 116), signals were not recorded because of foreseeable signal collisions. Before and after each abrasion experiment, the functionality of each transponder was checked and all the tagged and numbered pebbles were individually weighed and photographed. The untagged limestone pebbles were weighed as a whole, but not photographed. The effects of abrasion on tagged limestone and synthetic pebbles in terms of breakage and attrition were analyzed as follows.

The breakage, or fragmentation, was qualitatively classified according to changes in pebble characteristics. Breakage has potentially high effects on equipped particle characteristics (mass and shape) and on the RFID transponders as it could lead to separation of the particle and its transponder, or to their destruction. We expected breakage to be most sensitive to transponder insertion method. After each abrasion experiment, pebbles were identified, weighed, examined and classified into four categories:

- unfractured pebbles that do not present any visible sign of fracture or loss of pieces besides surface attrition or micro-abrasion, typically with a mass change of less than 3 g (typically 1% of initial pebble mass);

- “splinter loss” includes pebbles that show signs of micro-fracture and loss of fragments (sized from millimeters to one centimeter) that do not impact pebble size but cause significant mass reduction, typically more than 5 g (2% of initial pebble mass). These fragments are too small or too eroded to be recognizable or to reconstitute the pebble;
- fractured pebbles that are still recognizable but present obvious signs of macro-fractures implying significant losses of volume and mass, changes in shape and size, but not necessarily transponder loss. Fragments are large enough (several centimeters) to, be retrieved and allow us to reconstitute the pebbles.
- broken pebbles that are unrecognizable because they split into many pieces and lost their transponders.

After inspecting limestone pebbles, we sorted the fragments according to their origin either from tagged or untagged particles. To do so, we searched for and re-covered the pebbles with matching fragment losses to reconstitute the jigsaw of broken pebbles. Then, we weighed both fragments and source pebble samples and expressed the result as percentage of respective initial sample masses. Thus, we were able to compare effects of TIRIS PIT tag insertion methods on limestone pebbles.

Attrition, caused by interactions between pebbles, was analyzed by dividing individual pebble mass variations by the initial particle masses. Mass variation was divided by the estimated travel distance and is expressed as a percentage of mass reduction per kilometer. The attrition effect on RFID transponders was expected to be null, as well as the effect of RFID insertion methods on the attrition phenomenon.

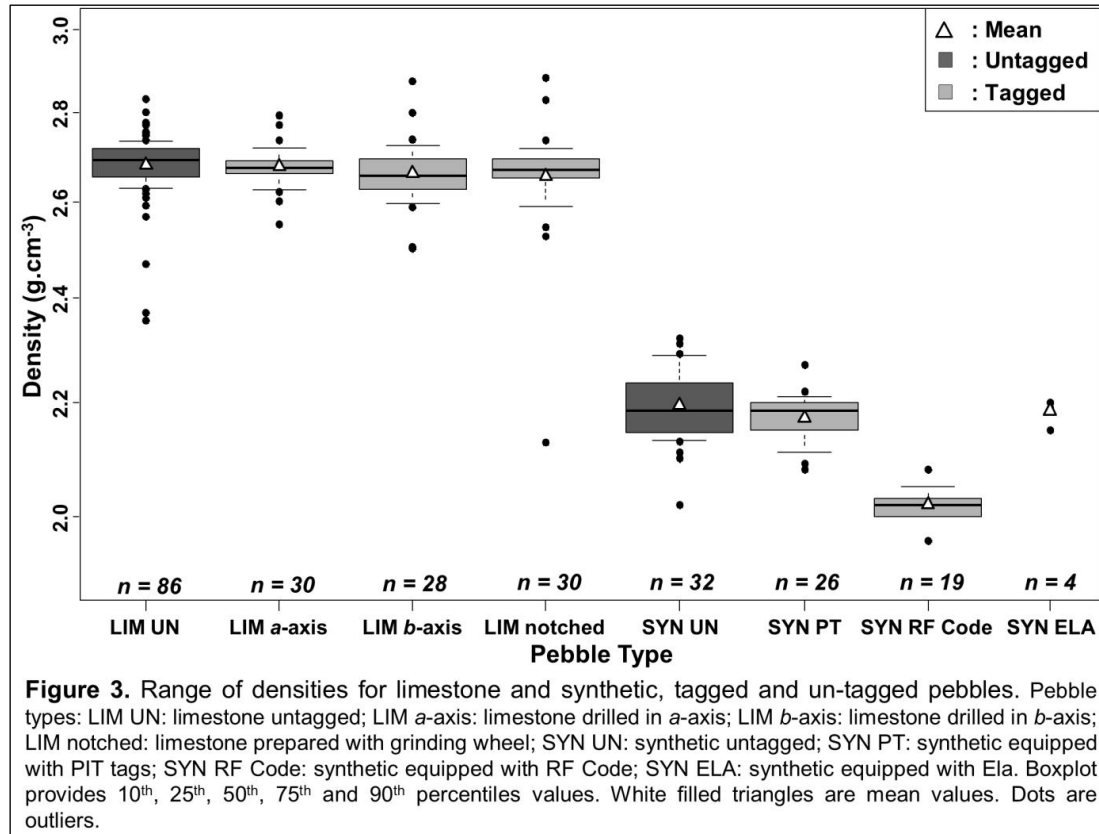
## **2.3 RESULTS**

### **2.3.1 Pebble densities**

Limestone and synthetic pebbles densities were slightly different (Figure 43). Even though casting was done with care, the mean density of synthetic pebbles was 18% lower than limestone pebbles for unequipped particles.

As expected, because of the very small volume ratio between TIRIS tags and pebbles (mean = 0.4%), TIRIS tag insertion in the limestone pebbles only caused a slight decrease in particle density. The tagged limestone pebbles had mean density differences of less than 1.5% compared to untagged pebbles. This corresponds with volume ratios between transponders and pebbles. Differences observed are consistent with the observations made by Liébault *et al.*

(2012), who documented a difference of 3% between average pebble masses before and after TIRIS tag insertion in marly pebbles notched with a grinding wheel. Differences in lithology, size and density between the pebbles we equipped and those equipped by Liébault *et al.* (2012) probably explain why our density variation value remains slightly lower than theirs.



**Figure 43. Distributions des densités des galets calcaires et synthétiques, équipés et non-équipés de transpondeurs.**

*Notes : SYN UN : galets calcaires non-équipés; LIM a-axis : galets calcaires percés le long de l'axe a ; LIM b-axis : galets calcaires percés le long de l'axe b ; LIM notched : galets calcaires incisés à la meuleuse ; SYN UN : galets synthétiques non-équipés ; SYN PT : galets synthétiques équipés de PIT tag ; SYN RF Code : galets synthétiques équipés de transpondeurs RF Code ; SYN ELA : galets synthétiques équipés de transpondeurs ELA.*

For synthetic pebbles, transponder type more drastically influenced pebble density. The different volume ratios between transponders and pebbles (means = 0.3%, 15.4%, and 5.3% for pebbles equipped with TIRIS, RF Code transponders and ELA transponders, respectively) produced differences in terms of density between equipped pebble groups.

TIRIS tag insertion caused variation of less than 1.5% in mean density, both for synthetic and limestone pebbles.

The mean density of synthetic pebbles fitted with RF Code transponders was 7.7% lower than that of untagged synthetic pebbles and 25% lower than untagged limestone

pebbles. This is consistent with the higher volume ratio between transponders and pebbles (Figure 43) and is likely to cause a difference in transport distance.

The four synthetic pebbles equipped with ELA active transponders had a mean density 0.5% lower than untagged synthetic pebbles and about 18.7% lower than untagged limestone pebbles. Density of this transponder model preserves the density of the synthetic pebble wherein it is introduced. This is a major advantage of ELA compared to RF Code transponders.

### 2.3.2 Pebble mobility patterns and velocities

The behavior of both synthetic and limestone pebbles was tested under two discharge conditions:  $215 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  and  $240 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . We measured mobility patterns (Figure 44), mean velocities, maximum velocities (given by the first peak value in the distribution of the lap durations), and the percentages of motion (defined by  $V_{\text{max}}/V_{\text{mean}}$ ) of the pebbles under each discharge. Percentage of motion is the percentage of time that a pebble spends in motion or, at a given time, the percentage of pebbles that are in motion (Tableau 16).

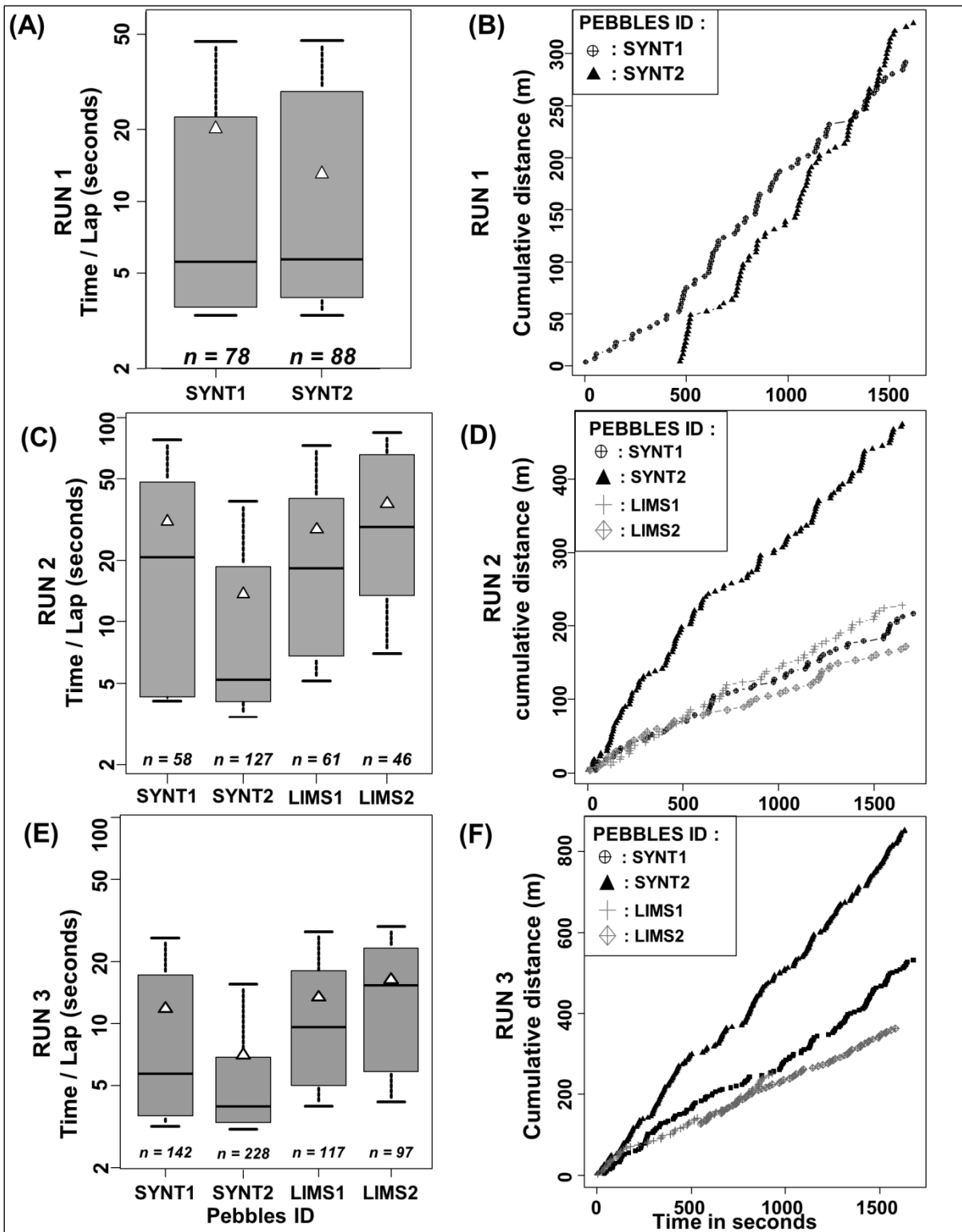
**Table 4: Velocity and travelled distances of the synthetic and limestone pebbles during the three distance measurement runs.**

Metrics	Pebble ID	Run 1	Run 2	Run 3
Number of Laps	SYNT1	78	58	141
Number of Laps	SYNT2	88	127	228
Number of Laps	LIMS1	X	61	117
Number of Laps	LIMS2	X	46	97
Mean velocity ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	SYNT1	0.18	0.12	0.38
Mean velocity ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	SYNT2	0.27	0.27	0.49
Mean velocity ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	LIMS1	X	0.13	0.25
Mean velocity ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	LIMS2	X	0.1	0.21
Maximum velocity ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )*	SYNT1	1.1	1.0	1.1
Maximum velocity ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )*	SYNT2	1.1	1.0	1.1
Maximum velocity ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )*	LIMS1	X	0.8	1.1
Maximum velocity ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )*	LIMS2	X	0.65	0.9
Distance travelled (m)	SYNT1	291	217	535
Distance travelled (m)	SYNT2	337	486	864
Distance travelled (m)	LIMS1	X	228	449
Distance travelled (m)	LIMS2	X	179	377
% of motion **	SYNT1	16	12	28
% of motion **	SYNT2	25	27	46
% of motion **	LIMS1	X	16	26
% of motion **	LIMS2	X	15	23

Note: \* as given by the first peak value in the distribution of the lap durations. Despite being called “maximum”, this first individual peak value does correspond to the average velocity observed during a lap without resting period, i.e. to the particle velocity averaged over ~10 successive saltation; \*\* as defined by  $V_{\text{max}}/V_{\text{mean}}$ . It can be viewed as the % of time that a pebbles is spending in motion or at a given time the % of pebbles that are in motion.

**Tableau 16. Vitesses et distances de transport des galets synthétiques au cours des expériences de suivis de mobilité.**





**Figure 4.** Monitored marked pebbles behaviors as a function of mobility pattern for each run. (A) (C) (E) present time per laps in seconds and (B) (D) (F) cumulative distance covered over time. Run 1: discharge  $Q = 215 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  and duration  $D = 30 \text{ min}$ ; Run 2:  $Q = 215 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  and  $D = 30 \text{ min}$ ; Run 3:  $Q = 240 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  and  $D = 30 \text{ min}$ . Boxplot provides 10th, 25th, 50th, 75th and 90th percentile values. Points interval is the time taken to complete the lap.

**Figure 44.** Structures de mobilité des galets monitorés en fonction des vitesses par tours (A, C et E) et des distances parcourues (B, D et E).

During all sets of experiments, alternations of motion and rest periods were visually observed through the lateral windows. This phenomenon is expected to produce variable lap durations, as indeed observed on our cumulative distance curves plotted as function of time (Figure 44.B-D-F). This confirms periods with faster or slower motion, interrupted by rest periods of shorter or longer duration similarly to the observations done by Schmidt and Ergenzinger (1992).

When discharge increases by 10% (from 215 to 240 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>), mean flow velocities slightly increase by 2%, while mean pebbles velocities and the percentages of motion increase by factors ranging from 1.8 (SYNT2) to 2.5 (SYNT1), and from 1.5 (LIMS2) to 2.3 (SYNT1), respectively.

Synthetic pebbles are faster than limestone pebbles (Figure 44.C and .E), with a mean velocity (0.21 m.s<sup>-1</sup>) that is 46% higher than that of limestone pebbles (0.115 m.s<sup>-1</sup>) at 215 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. At 240 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, this difference is slightly greater (48%) with respective mean velocities of 0.43 m.s<sup>-1</sup> and 0.23 m.s<sup>-1</sup> for synthetic and limestone pebbles.

These observations are partly due to the fact that the pebble SYNT2 is much faster than the others, including SYNT1, and exhibits greater mean velocities and percentages of motion and fewer rest periods than the other three pebbles. Indeed, it covered a significantly greater number of laps for each discharge and in each run, compared to SYNT1, LIMS1 and LIMS2 (Tableau 16).

At low discharge, SYNT1, LIMS1 and LIMS2 pebbles present similar mobility patterns (Figure 44.C and .D) and characteristic values. Mean velocities of SYNT1 (0.18 m.s<sup>-1</sup> and 0.12 m.s<sup>-1</sup>) and percentages of motion (16% and 12%) are very similar to the values observed for LIMS1 (0.13 m.s<sup>-1</sup> and 16%) and for LIMS2 (0.1 m.s<sup>-1</sup> and 15%).

At higher discharge (Q=240 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>), SYNT1 values diverge from those of LIMS1 and LIMS2. Indeed, mean velocity and percentage of motion increase by a greater factor (2.5 and 2.3 respectively) for SYNT1 than for LIMS1 (1.9 and 1.6 respectively) and for LIMS2 (2.1 and 1.5 respectively). The mobility pattern of SYNT1 differs slightly from those of LIMS1 and LIMS2 in that it shows larger amplitudes of velocity variability (Figure 44.B3).

### **2.3.3 Pebble abrasion during transport**

Mean traveling velocities measured during the first set of experiments are used to estimate the distances travelled by pebbles during the second set of experiments since they are conducted under similar conditions (discharge, pebble size, and quantity). Estimates of the

average distances travelled, including uncertainties that account for the large disparity between SYNT1 and SYNT2 velocities are presented in Tableau 17. For the following analyses we assume that during the four abrasion experimentations, which lasted a total of 180 minutes, the synthetic and limestone pebbles travelled 3.5 km and 2.1 km, respectively.

**Table 5: Estimates of the distances travelled in meters by the synthetic and limestone pebbles during the four abrasion experiments**

	Experiment 1 (S1)	Experiment 2 (S2)	Experiment 3 (S3)	Experiment 4 (S4)	Sum of the four experiments
<b>Synthetic pebbles</b>	349/392/448	698/784/895	684/760/855	1368/1520/1709	2882/3456/4180
<b>Limestone pebbles</b>	188/220/265	375/439/530	418/462/516	836/924/1033	1690/2045/2507

Note: values represent minimum/mean/maximum of estimates of the distances travelled in meters.

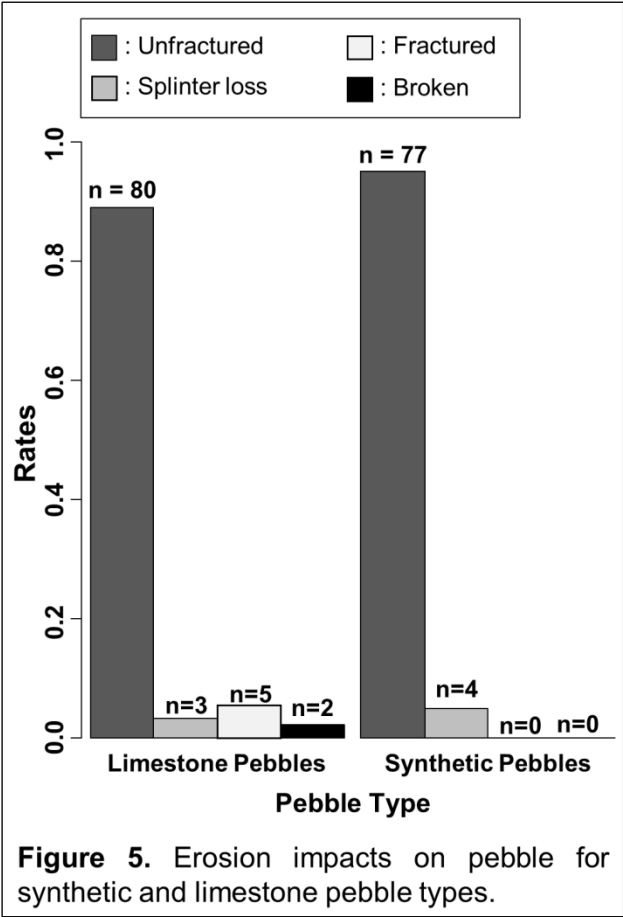
**Tableau 17. Estimations des distances de transport en mètres des galets calcaires et synthétiques durant les expériences d'abrasion.**

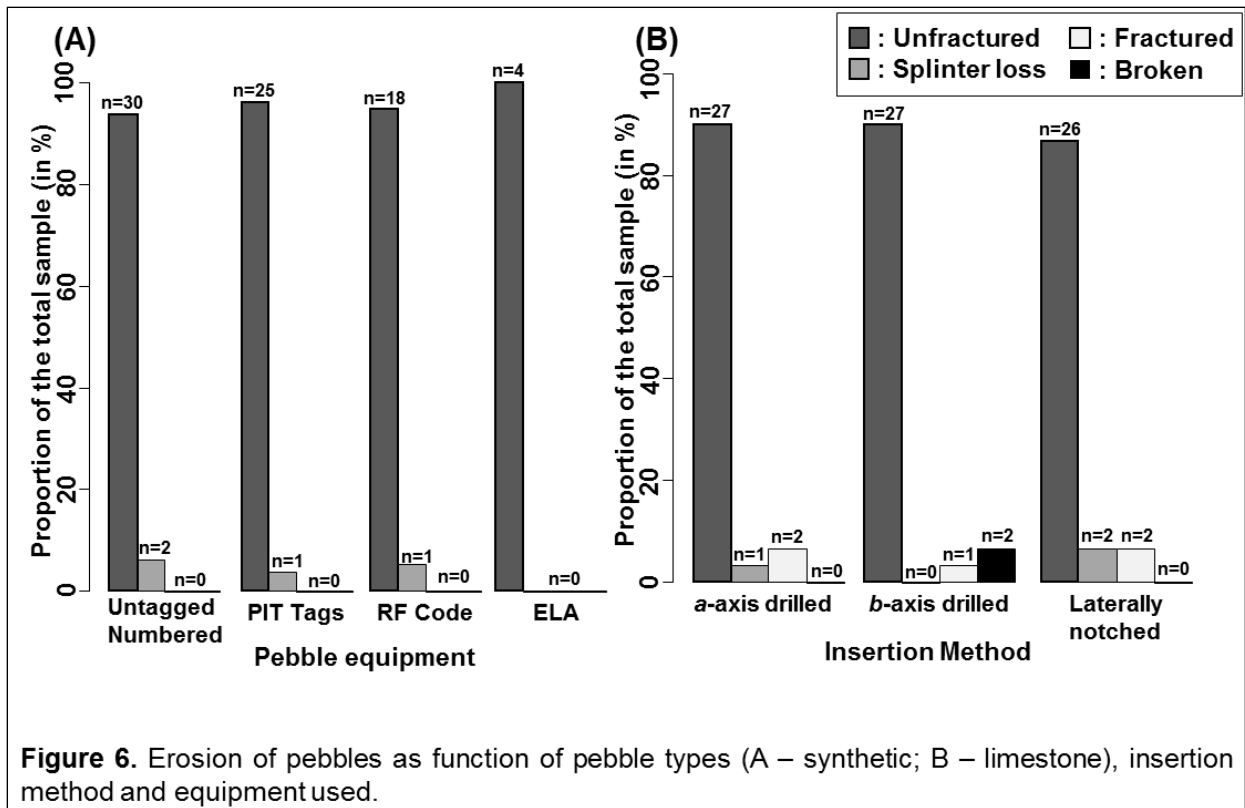
2.3.3.1 Pebble breakage.

After the four abrasion experiments and a distance travelled of 3.5 km, 95% of all of the synthetic pebbles remained unfractured (Figure 45). The 5% left (corresponding to four pebbles) exhibited only splinter loss. None of the synthetic pebbles were fractured or broken. Both synthetic pebble sub-samples (tagged and untagged) have similar abrasion patterns (Figure 46.B).

On the other hand, after the four abrasion experiments and a distance travelled of 2.1 km, 89% of the limestone pebbles remained unfractured, 3.5% (three pebbles) suffered splinter loss, 5.5% (five pebbles) were fractured, and 2.2% (two pebbles) were broken. Thus, the synthetic pebbles are more resistant to breakage than limestone pebbles.

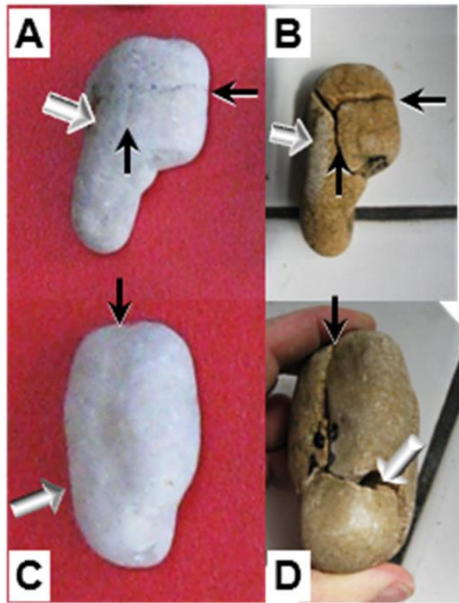
**Figure 45. Phénomènes d'érosion observés sur les galets calcaires et synthétiques.**





**Figure 46. Phénomènes d'érosion observés sur les galets calcaires (A) et synthétiques (B) en fonction de la méthode d'équipement.**

The two broken limestone pebbles are shown in Figure 47, before (Figure 47A and C) and after fragmentation and pebble reconstitution (Figure 47B and D). Pictures of pebble B03 (Figure 47A and 7B) show that breakage occurred along two visible structural discontinuities (marked with black arrows) present before the abrasion experiments. In this case, fissures appeared along these two weakness zones and not along the hole drilled for TIRIS tag insertion (white arrow). But, even if breakage did not occur along the TIRIS tag location, the ratio of the TIRIS tag length to the drilled axis (Figure 49) for this pebble is about 70%. This means that the hole drilled probably reached at least one of the two material discontinuity planes. Thus, TIRIS tag insertion is one explanation for pebble breakage. Pictures of the pebble B02 (Figure 47C and D) show that it broke along the hole drilled for TIRIS tag insertion, which in this pebble's case is 54% of the length of the drilled axis. But Figure 47C and D also show that another breakage occurred perpendicularly to the previous one along the particle's concave edge (black arrow). It is impossible to say if one fracture occurred first and if it facilitated the second one, or if both fractures occurred at the same time.



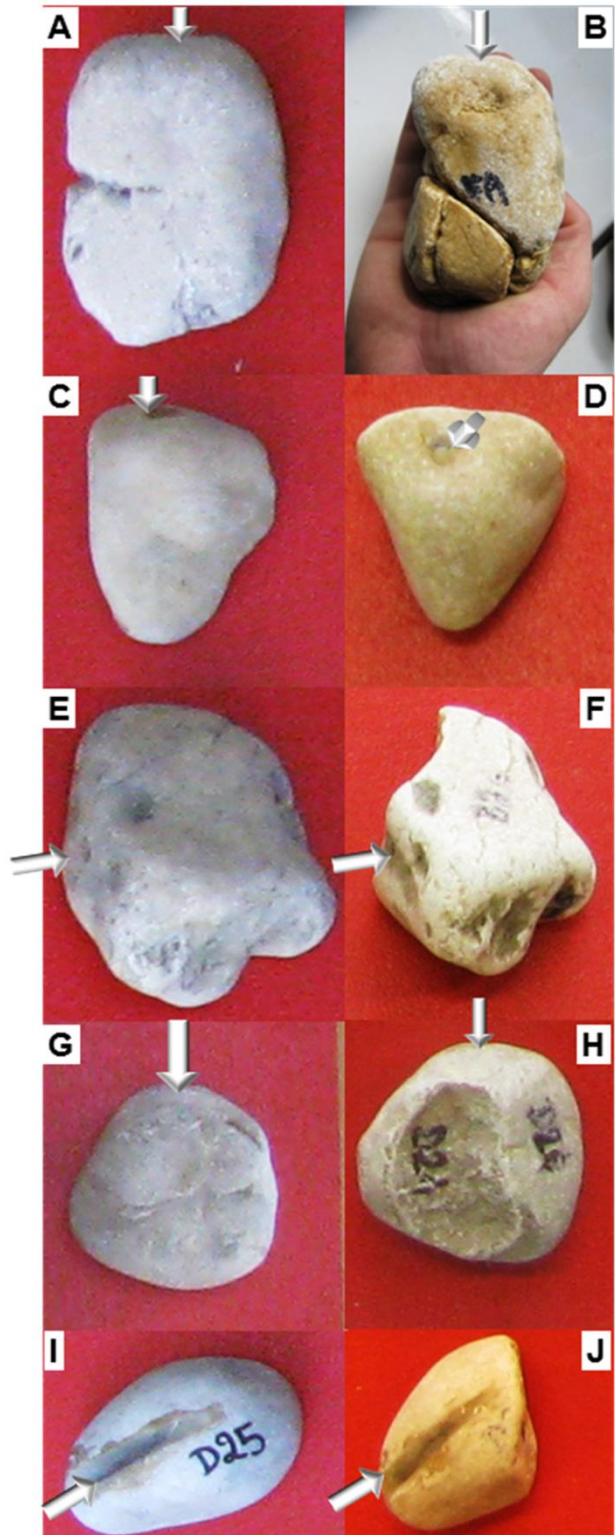
**Figure 7.** Limestone pebbles B03 (A,B) and B02 (C,D) before (A,C) breakage during abrasion runs and after pebble reconstitutions (B,D). Black arrow indicates structural discontinuities. White arrow indicates PIT tag insertion location.

**Figure 47.** Galets calcaires B03 (A et B) et B02 (C et D) avant (A et C) et après fragmentation (B et D).

*Notes :* Les flèches blanches indiquent l'emplacement du PIT tag, les flèches noires les discontinuités structurales.

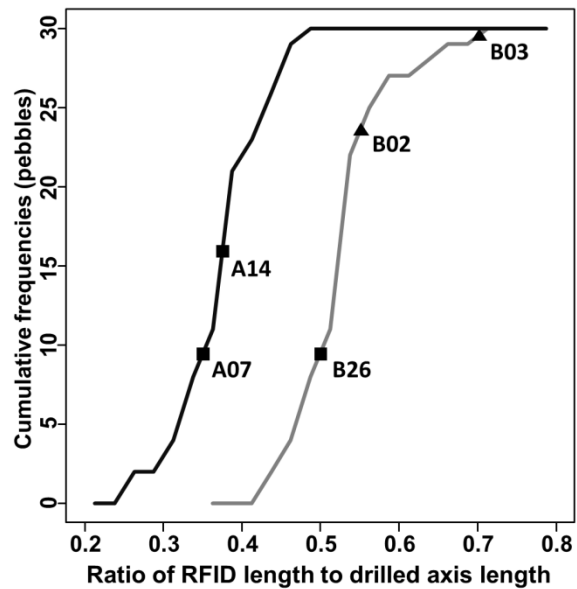
**Figure 48.** Les galets calcaires A03 (A et B), A14 (C et D), B26 (E et F), D24 (G et H) et D25 (I et J) avant (A, C, E, G et I) et après (B, D, F, H et J) fragmentation.

*Notes :* Les flèches blanches indiquent l'emplacement du PIT tag



**Figure 8.** Limestone pebbles A03 (A,B), A14 (C,D), B26 (E,F), D24 (G,H) and D25 (I,J) before (A,C,E,G,I) and after abrasion runs (B,D,F,H,J). White arrow indicates PIT tag insertion location.

The five fractured limestone pebbles are presented in Figure 48, before (Figure 48 A, C, E, G and I) and after fragmentation (Figure 48 B, D, F, H and J). None of the breakages occurred along TIRIS tag insertion axes, be they drilled holes or notches. This also explains why the breakages did not cause TIRIS tag loss. At least three pebbles (A07, B26 and D24, cf. Figure 48 A and B, Figure 48 E and F and Figure 48 G and H respectively) present visible material discontinuities along which some, but not all, breakages occurred. Considering TIRIS tag location and ratio of RFID length to the drilled axis of pebbles B26 and A07 (Figure 49), it seems unlikely that the drilled holes reached the planes of the material discontinuities. There were no visible material discontinuities on the other two fractured pebbles (A14 and D25, cf. Figure 48 C and D and Figure 48 I and J, respectively).



**Figure 9.** Cumulative frequencies of the ratio 'RFID length to the drilled axis length' for limestone pebbles. Dark and grey lines represent pebbles drilled along a-axis and b-axis respectively. Squares and triangles represent 'fractured' and 'broken' pebbles respectively.

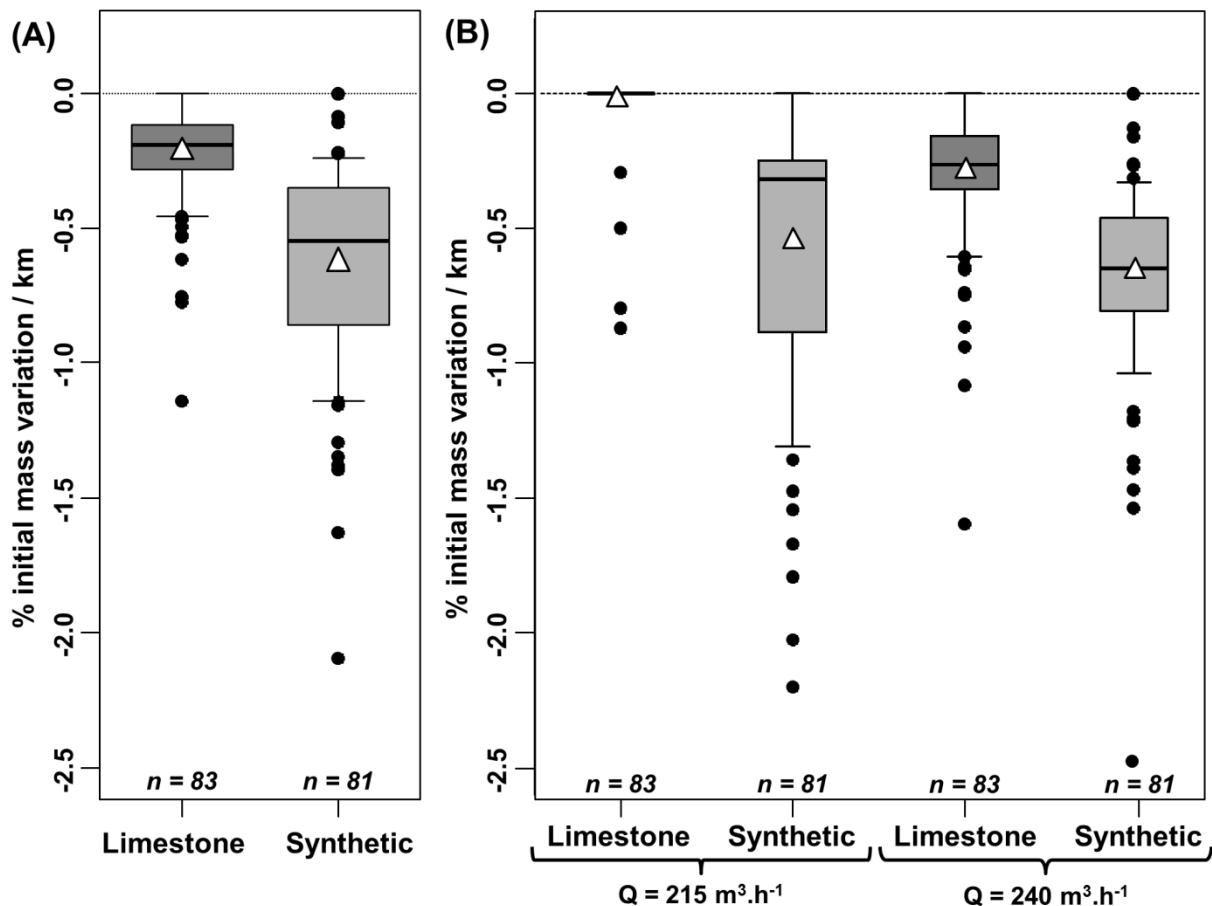
**Figure 49. Fréquences cumulées du ratio longueur du PIT tag sur l'axe percé du galet.**

*Notes :* les carrés et triangles représentent respectivement les galets « fracturés » et « fragmentés ».

The comparison of broken pebble characteristics and ratio of TIRIS tag length divided by the length of the drilled axis shows that this ratio cannot be considered as the only factor determining pebble breakage because pebbles with high ratios did not necessarily break (Figure 49).

**2.3.3.2 Pebble attrition.**

Percentages of mass change per kilometer for monitored pebbles are presented in Figure 50. These values only consider pebbles from the unfractured and splinter loss classes. Indeed, in the case of fractured and broken classes, it is impossible to distinguish mass changes attributable either to breakage or to attrition.



**Figure 10.** Proportion of initial mass variation over travel distance (A) by pebble type after four abrasion experiments and (B) by pebble type according to the two discharges investigated. Only unbroken and unfractured pebbles are shown. Boxplot provides 10th, 25th, 50th, 75th and 90th percentile values. White filled triangles are mean values. Black filled dots are outliers.

**Figure 50.** Proportion de masse initiale perdue par kilomètre voyagé (A) par type de galet et (B) en fonction des deux débits investigués.

After the four abrasion experiments, synthetic pebbles had mean and median values of mass change per kilometer that were 2.9 and 2.8 times that of limestone pebbles respectively (Figure 50 A). The different discharges influenced attrition intensity for both limestone and synthetic pebbles (Figure 50 B). Indeed, limestone pebbles experienced little attrition at low discharge ( $Q = 215 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), whereas attrition became more intense at higher discharge ( $Q = 240 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ). Synthetic pebbles exhibited a higher proportion of mass loss over distance travelled than limestone pebbles even at lower discharge. Attrition phenomenon intensity on synthetic pebbles also rose with higher discharge, but less drastically than for limestone pebbles. The difference of mass variation per kilometer between synthetic and limestone pebbles decreased at higher discharge (ratio of averages = 2.3) compared to the lower discharge (ratio of averages = 19.1). Thus, synthetic pebbles are more sensitive to attrition than limestone pebbles, especially at low discharge.

### 2.3.3.3 Impact of insertion techniques on pebble breakage and attrition.

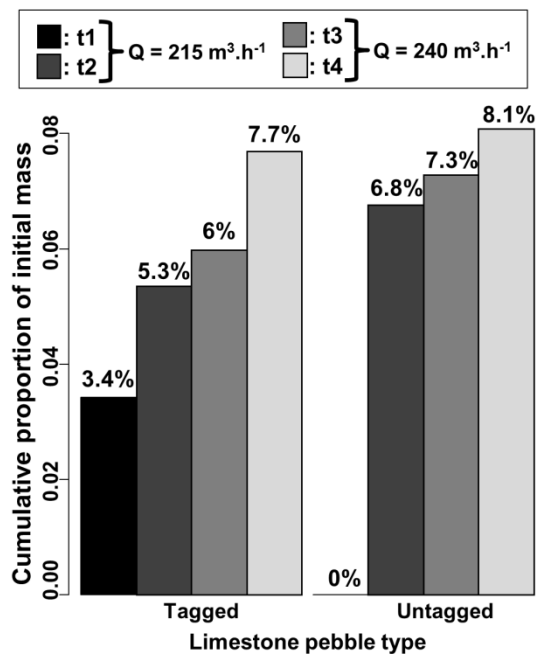
As previously noted, no synthetic pebble was fractured or broken. Therefore, the proportions for these classes are null for all subsets of equipped or unequipped synthetic particles. There are only very slight variations between the rates of the equipment subsets for the unfractured (proportions range from 93% to 100%) and splinter loss classes (proportions range from 0 to 6%) (Figure 46 A).

All subsets of equipped limestone pebbles show unfractured class proportions above 86% (Figure 46 B): 90%, 90% and 86% for pebbles drilled along the a-axis, the b-axis and laterally notched, respectively. All subsets also include one or two fractured pebbles, which represent nearly equivalent proportions. Thus, no insertion technique appeared to impact the pebble's sensitivity to fracture. In particular, close observation of the fractured pebbles (see section 3.3.1, Figure 47 and Figure 48) corroborated that only one single fracture occurred along a TIRIS tag location.

The two broken limestone pebbles correspond to pebbles equipped with TIRIS tags inserted into holes drilled along the b-axis. But, a close observation of these two pebbles revealed that breakage was attributable to TIRIS tag insertion for only one of them: B02.

Breakage occurred first (during the first abrasion experiment) on tagged limestone pebbles (Figure 51). After two abrasion experiments at low discharge ( $Q = 215 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), untagged limestone pebbles exhibited a slightly higher breakage proportion than tagged limestone pebbles. After two abrasion experiments at high discharge, the two subsets exhibited very similar percentages of breakage. The difference between the two subsamples (0.4%) represents 395 g: the equivalent of the mass of a single pebble. Despite the minimal difference between the two sample breakage percentages at the end of the abrasion experiments, the breakage occurred at different times for the two subsamples.

**Figure 51. Part cumulée de la masse initiale des galets calcaires fracturée ou fragmentée après chaque expérimentation d'usure.**

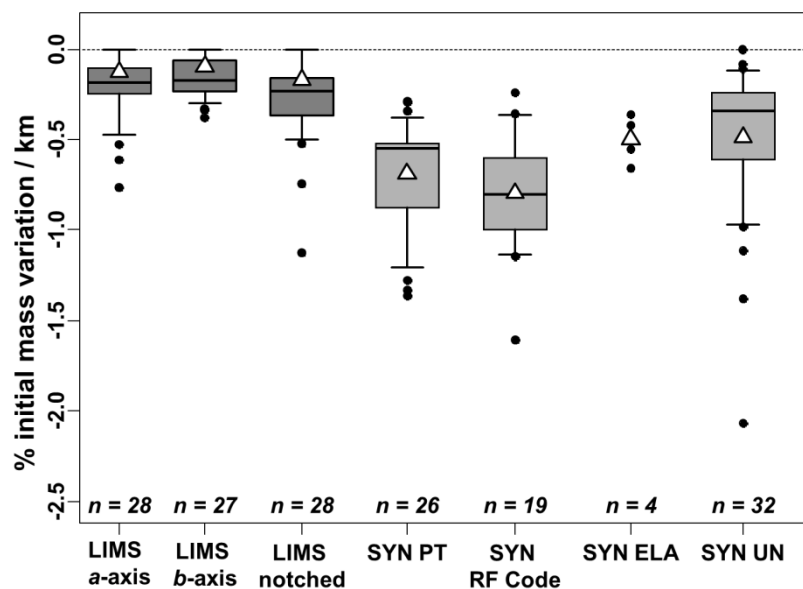


**Figure 11. Cumulative proportion of the initial mass of limestone pebble samples fractured or broken after each abrasion experiments.**



Indeed, breakage of untagged pebbles occurred mainly during the second abrasion experiment at low discharge (6.7% of initial sample mass: 83% of all breakage observed during the four experiments). Then it increased very slowly (+ 0.05% and + 0.07% for S3 and S4, respectively). Tagged pebbles exhibit a more constant fracture occurrence: three of the four experiments exhibited a breakage percentage higher than 1.9%. Thus, the sensitivity of limestone pebbles to breakage is only slightly affected by TIRIS tag insertion or by insertion method. Attrition of limestone pebbles is not influenced by the method of TIRIS tag insertion. TIRIS tag presence does not seem to unduly weaken the limestone pebbles (Figure 45 and Figure 50). In the cases of fracture and destruction of limestone pebbles, additional fractures were not observed due to TIRIS tag insertion. However, some pebbles equipped with TIRIS tag broke earlier than those with no tags (Figure 50).

Figure 52 presents the percentage of mass change divided by the travelled distance according to RFID equipment type for the “unfractured” and “splinter loss” classes of limestone and synthetic pebbles. As expected, RFID equipment and insertion methods exhibit no significant influence on sensitivity to attrition for the different limestone pebble subsamples. Surprisingly, the synthetic pebble subsamples present more variability. Indeed, the untagged pebbles and the four equipped with ELA transponders showed less mass change than those with TIRIS tags or RF Code transponders.



**Figure 12.** Proportion of initial mass variation over travel distance by RFID equipment and pebble type. Only unbroken and un-fractured pebbles are shown. Boxplot provides 10th, 25th, 50th, 75th and 90th percentile values. White triangles are mean values and black dots are outliers.

**Figure 52. Proportion de la masse initiale perdue par kilomètre voyagé en fonction du type de galet et l'équipement RFID.**

### **2.3.4 About tag dysfunction.**

As a corollary of pebble breakage, all the TIRIS tags inserted in limestone pebbles that were destroyed stopped functioning. Of the 126 TIRIS tags, only two (corresponding to 1.6%) were “out of service” at the end of the experiment. Besides the two broken limestone pebbles, we observed only one additional case of TIRIS tag dysfunction. It occurred sometime between insertion and the first abrasion experiment, probably during transport and/or manipulation. Thus, it was recorded as a dysfunction due to abrasion.

Of the 19 RF Code transponders, two stopped functioning by the end of the experiment. Because these transponders were molded within synthetic pebbles, they were protected from direct impact. In the absence of any external damage, we hypothesize that repetitive impacts of the synthetic pebbles with other pebbles or with the flume bottom generated vibrations or even shocks within the transponder boxes. Since the electronic components within each transponder box contain slight vacuums, these vibrations may have caused battery disconnection or a welding rupture in one of the components.

All four ELA transponders were still functioning at the end of the experiment, which suggests that ELA transponders systems and packaging are resistant enough for long-term pebble tracking.

The overall ‘survival’ rate for TIRIS PIT tags was 98.4% when inserted in limestone after 2.1 km of transport. In the artificial pebbles, it was 100% for TIRIS tags as well as for ELA transponders, but only 90% for RF Code transponders after 3.5 km of transport.

## **2.4 DISCUSSION**

### **2.4.1 Representativity of experiment and transport distance.**

Alluvial transport displays a wide range of hydrodynamic and bedload transport conditions. However, most studies summarized by Chapuis *et al.* (2015) were conducted in relatively mild sediment transport conditions, i.e. sufficient to transport pebbles, but neither in very steep channels exposed to highly torrential conditions nor in debris flows.

The mean velocity values observed in our study are consistent with the results of Attal and Lavé (2009). They used a 75 kg mass sample of limestone pebbles (whose b-axis ranged from 40 to 60 mm), colored pebbles and a high speed camera, and they reported mean velocities of  $0.17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and  $0.48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  at respective discharges of  $230 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  and  $260 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ . Habersack (2001) measured particle instantaneous velocity and determined a mean value of  $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and a maximum of  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  on the Waimakariri River (New-Zealand) where he

studied particles equipped with radio transmitters measuring time and distance of their displacement. Compared to Habersack (2001), our mean and maximum values are systematically lower ( $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  and  $1.1 \text{ m.s}^{-1}$ : the highest mean and maximum velocity observed in our study cf. Table 3), but they remain in a comparable range of values.

As shown by Attal and Lavé (2009), we can expect that with higher pebble velocities, intensities of abrasion and attrition phenomena will also be higher. Thus, transponder survival rates could accordingly be expected to be lower. Nevertheless, we attempted to replicate conditions fairly similar to rivers usually studied with our techniques (cf. Chapuis *et al.*, 2015).

Pebble velocities were calculated here by using the time interval for each lap. Thus, velocity values are averaged at the lap scale. However, variation in velocities was observed for each pebble monitored, namely an alternation of motion and rest periods. Further, we observed the formation of particle groups that blocked and slowed pebbles for varying durations while other particles remained in motion. This phenomenon of discontinuous transport patterns composed of motion and rest periods is similar to that observed in field conditions by Ergenzinger *et al.* (1989), who surveyed particles equipped with radio transmitters measuring time and distance of their displacement.

The distances considered in this study are greater (by a factor 2.5 at least) than almost all the maximum distances measured in situ during studies reported by Chapuis *et al.* (2015). Thus, mobility patterns and observed distances considered here are more consistent with those reported in field studies.

Regarding pebble type, synthetic pebbles appear to have travelled faster than the limestone pebbles sourced from the Ain River, granted that this observation is based on the variable behaviors of only two synthetic pebbles. The four pebbles used to measure velocity, two natural and two synthetic, were pairs of similar size and sphericity. Thus, one of the most likely reasons for difference in velocity is related to differences in density. Indeed, a less dense particle is easier to mobilize and, at equal volume, presents a lower inertia. This results in higher instantaneous and averaged velocities and easier remobilization when stopped, leading to shorter rest periods.

#### **2.4.2 Particle resistance.**

Experimental pebble velocity values observed in this study and compared to pebbles velocity measured in the field by previous study (cf. 4.1), imply that pebbles were exposed to impacts of comparable energy as those experienced during bedload transport in gravel-bed

rivers. Thus, breakage results can be considered as representative of this process when keeping in mind the travelled distances estimated and, for the limestone pebbles, the lithology.

Synthetic pebbles which are solid, without material discontinuities seem unbreakable at the distances and velocities investigated in this study (Figure 5 and 6). The four synthetic pebbles that suffered from splinter loss during abrasion experiments still contained shape imperfections, even after the casting process, demonstrating the shape imperfections assessment and improvement is important. Thus, they presented material discontinuities causing loss of fragments, which in fact were these plugs. Overall, synthetic pebbles are more prone to attrition than limestone pebbles. An examination of synthetic pebbles reveals a difference in texture between the lower and upper parts of pebbles. On the upper part, we observe a smooth and regular surface containing half bubbles. The lower part feels granular to the touch and a few corundum grains stick to one's fingers when rubbing. This leads us to believe that a decantation process occurs in the molds after casting, when the mixture remains semi-liquid for few minutes until it hardens. Thus, the upper part is formed of an almost 100% polyurethane mixture while the lower part contains a lesser proportion of polyurethane resin, making it more sensitive to attrition. This phenomenon could also possibly modify pebble equilibrium and its mobilization.

The TIRIS tag insertion method only slightly influenced limestone pebble sensitivity to breakage (Figure 46). The ratio of RFID tag length to the drilled axes, which is highly influenced by the drilled axis length (the shorter the axis, the higher the ratio) was not related to breakage. Breakage observed in this experiment is mainly due to material discontinuities (5/7) that were intersected (2/5), or not (3/5), by holes drilled for RFID tag insertion. In any case, limestone pebble breakage seems to be a marginal explanatory factor for low tagged pebble recovery rates on the Ain River (25 – 36% in situ). Attrition effects on pebbles depend on the lithologies investigated. But, the processes that took place in our study are expected to be similar to other bedded or carbonate lithologies (Attal and Lavé, 2009).

Thus, the remaining technical explanations for low TIRIS tag recovery rates in the field are signal collisions and limited detection range of the antennas used. The first one is more likely to occur in small systems with limited dispersion of the tracers. The second strongly limits TIRIS tag detection in large and dynamic systems with thick, active sediment layers or very fast dispersion of the tracers. While active sediment layer thickness can be estimated with scour chains (Haschenburger and Church, 1998; Liébault and Laronne, 2008;

Wong *et al.*, 2007) or DEM analysis (Lallias-Tacon *et al.*, 2014), the quick dispersion is, to date, much more complicated to establish. In these two contexts, the ELA active transponders have shown very encouraging results since they can be detected 2.6 m above a sediment layer saturated of water without and collision constraint (Cassel *et al.*, submitted). Consequently some authors distinguish maximum travel distance observed from maximum travelled distance reported as “not available” (see Chapuis *et al.* 2015). Indeed, since all tags are not recovered, authors cannot exclude the probability that one of the un-recovered tags travelled farther than the recovered ones. This emphasizes the benefit of a fixed or stationary antenna at the outlet of the study site, when possible. Two major considerations would need to be taken into account for such an antenna. To assure the detection of tracers in motion, and following Schneider *et al.* (2010), the antenna should be spanned along the whole river cross-section, and the sensing field of the antenna would need to be sized as a function of expected pebble velocities and of the TIRIS PIT tags size. Establishing the sensing field in this way would allow tracers to spend at least two reader cycles within the detection field. To prevent signal shadowing problems, the antenna should be located in a river section where the tagged pebbles would not stand in its detection field but leave after their detection. This would provide information on the quick dispersion of tracers, and thus would supplement the information given by the maximal distance of travel recorded.

### **2.4.3 Active vs. passive transponders.**

As detection range and signal shadowing remain the primary explanatory factors for low recovery rates of TIRIS tags in situ, active Ultra High Frequency transponders may provide a suitable solution to minimize this effect. Indeed, they offer detection ranges of up to ten meters and contain signal anti-collision protocols. Thus, they could work well in deeper rivers ( $\leq 2\text{m}$ ) with quick dispersion of tracers and also for shallow, narrow rivers prone to tracer clustering. However, active UHF transponders, especially the RF Code, seem to be more sensitive to dysfunction when cast in synthetic pebbles and used for bedload tracking. More studies are needed, especially with ELA transponders, because we disposed of only four of them, which is not statistically representative. New protocols for in situ surveys for particles equipped with ELA transponders will need to be developed, first by characterizing the signal propagation of these transponders when buried or immersed in aquatic environments. Initial tests have been encouraging as they prove that ELA transponders can be detected in situ below at least 2.5 m of water depth.

#### **2.4.4 Future challenges for equipped synthetic pebbles.**

The process presented here for synthetic pebbles fabrication appears to be useful for the creation of tracers equipped with active UHF transponders. They are unbreakable and allow for specific shape reproduction.

However, synthetic pebble density is an issue that interferes with pebble mobility and their representativity of the natural pebbles they are supposed to mimic. The density values obtained in this study for synthetic pebbles are comparable to those obtained by Nichols (2004) for synthetic particles; he reported an average density for his synthetic particles of 2.2 with a standard deviation of 0.1, which was very similar to the natural rocks in his study watersheds (average density: 2.3 and standard deviation of 0.2). Sear *et al.* (2008) created denser pebbles by using baryte (BaSO<sub>4</sub>) powder, with densities ranging from 2.6 to 2.7, which are greater than our values.

Propitiously, the four pebbles equipped with ELA active transponders have density values that range from 2.15 to 2.2, with a mean of 2.18. The compact shape of this transponder model and its smaller volume compared to RF Code (about three times smaller) allowed us to maintain the density of the ELA-embedded synthetic pebbles and develop promising research opportunities in terms of pebble tracking.

The lower density of an untagged synthetic pebble compared to limestone is due to bubble formation during casting and trapped into the pebble. This was confirmed by cutting a pebble in two with a circular saw. These bubbles were formed when corundum powder was added to the mixture. Because of the short time for the mixture to harden (especially in warm conditions), we did not have enough time to eliminate bubbles from the mixture. Therefore, additional tests should be conducted by using a vacuum bell to extract bubbles in a colder environment or with a polyurethane resin which hardens more slowly to allow adequate time to extract bubbles and cast the mixture before it hardens. Shifting the mold orientation during resin hardening might also prevent corundum decantation. Tests should also be conducted with larger, commercially-available corundum grains. The challenge is to find a better grain size and shape that would reduce voids between corundum grains, reduce air incorporation in the mixture, and reduce the proportion of resin required. The use of concrete mixed with corundum to adjust the density is a technique to explore as concrete has a much higher density than polyurethane resin and such a mixture could be injected into molds with a casting ladle.

Higher variations in densities of artificial pebbles compared to limestone pebbles may also be related to their creation process. Due to the high density of the corundum and, because

of the movement and pressure due to injection, decantation occurs and the first pebbles casted may be denser than the last ones.

TIRIS tag insertion had the same effect on synthetic and limestone pebbles densities. Differences between mean densities of synthetic pebbles equipped with RF Code and limestone pebbles (about 25%) is clearly due to the high volume of these transponders. An increase in corundum proportion, which is limited by a minimum fluidity for casting the mixture, was not sufficient to make up for the low densities of these transponders.

The high resistance of synthetic pebbles to fracture allows for TIRIS PIT tag insertion along the c-axis, which is beneficial for tracers deployed in environments with greater water depths or with lithology that is very sensitive to abrasion and/or with low density sediment.

## **2.5 CONCLUSION**

We have run a series of experiments to test the influence of tag insertion on the integrity of artificial and limestone pebbles. Based on our results, we make the following recommendations. Damage to equipped limestone pebbles is fairly infrequent and cannot explain low recovery rate observed in the Lower Ain River. However, particular attention should be paid to the presence of material or structural discontinuities in the equipped pebbles, as it may not necessarily cause fractures in the pebbles during drilling or notching, but could later cause damage during alluvial transport. Remaining explanatory factors for low recovery rates are related either to the short detection range of TIRIS PIT tags when buried below the antenna detection range, or the time invested in searching for tags (due to broad dispersion or alternatively very limited dispersion, leading to RFID signal shadowing/collision).

Active UHF tags address these limitations by virtue of their larger detection range and signal anti-collision properties. The higher volume of these tags requires them to be cast in synthetic material. As they do not present material discontinuities, such synthetic pebbles are unbreakable but do suffer from greater attrition than limestone pebbles. The synthetic pebbles produced here have been shown to function well for this application.

Based on this experiment, we are fairly optimistic regarding the use of ELA transponders for tracking pebbles in rivers because of their low effect on pebble density and the fact that their signals do not interfere with one another. Further tests should be conducted with these transponders to test them *in situ* and assess if we can determine a distance of detection from the *RSSI* value (*Received Signal Strength Indication*). If these tests are

conclusive, a specific method for in-field surveys should be developed to measure the active layer thickness beneath which they are detected and thus geolocate them efficiently.

To optimize synthetic pebble production, we still need to increase their density and reduce inter-particle variability by improving mixing and insertion processes or testing other materials such as geopolymers. Even if the density of artificial pebbles is not the same as natural pebbles, we observed that a lower density has not systematically affected particle transport. Additional experiments are needed to better understand the effects of pebble shape versus density on factors related to transport distance which may lead to calibration of a correction factor.

The introduction of RFID systems and a specially-designed antenna in an annular flume offers a complementary approach to Particle Image Velocimetry methods for measuring velocity and distance of travel by several pebbles during experiments in this flume.

## **ACKNOWLEDGMENTS**

This study was supported by a research grant between the French National Center of Scientific Research (CNRS) and Electricité de France (EDF). We kindly thank the anonymous reviewer and Mikael Attal for their constructive comments, Robin Jenkinson for linguistic edits, Fanny Arnaud and Jean-René Malavoi for constructive scientific exchanges, and Ludovic Bultingaire for his great technical support.





### CHAPITRE 3 : ÉVALUATION D'UNE NOUVELLE SOLUTION POUR LE TRAÇAGE DE GALETS EN MILIEU FLUVIAL BASÉE SUR DE LA RADIO IDENTIFICATION ACTIVE.

#### Article numéro 2 :

Cassel M, Piégay H, Dépret T. 2017. "Assessment of new solution for tracking pebbles in rivers based on active RFID" Earth Surface Processes and Landforms: DOI: 10.1002/esp.4152A

**Abstract:** Low-frequency passive integrated transponders (PIT tags), are commonly used for monitoring pebble mobility in gravel-bed rivers. Although early studies reported high recovery rates for PIT tags used in small streams, recovery rates in larger systems remain low, substantially limiting the possibilities for their use in such rivers. These low recovery rates are potentially due to missed detections caused by tag signal collision, burial in the sediment layer deeper than the maximum detection range and insufficient (but still exhausting) field effort to cover the concerned areas. A potential solution for addressing these problems is to use ultra-high frequency active transponders (UHF-a) as these have a greater detection range and anti-collision protocols. In order to assess the potential of such transponders for pebble tracking in rivers, we used 433.92 MHz COIN-ID and -HC models (ELA Innovation Company). We completed several tests to (i) characterize transponder detection ranges in the water and in saturated sediment and (ii) develop field protocols for locating tags by combining GPS positions and transponder received signal strength indication (RSSI) levels. The results showed that (i) the maximum detection ranges are about 2.4 meters in the water column and more than 2.6 meters in a column of saturated gravelly-sandy sediment, (ii) RSSI spatial interpolation can be used to determine transponder position with good accuracy (< 1 m), (iii) the desired minimal level of accuracy can be adjusted depending on in-field effort and signal impulse interval, (iv) the RSSI maximal value observed cannot yet be used to determine transponder burial depth because of the multipath propagation of radio frequencies and the semi-directional emission of the tag signal.

**Key-words:** pebble tracking, active UHF transponders, RSSI spatial interpolation, RFID

### 3.1 INTRODUCTION

Pebble tracking techniques have been employed in riverine environments for several decades. Their uses have included the study of particle transport paths (Thorne and Lewin, 1979; Church and Hassan, 1992; Habersack, 2001; Ferguson *et al.*, 2002b; Milan, 2013; Chapuis *et al.*, 2015), influences of particle mass and shape on particle mobility (e.g. Schmidt and Gintz, 1995; Sear *et al.*, 2008), spatial and temporal variability of bed mobility (Wilcock *et al.*, 1996; McNamara *et al.*, 2004; Rovira *et al.*, 2008; Camenen *et al.*, 2010; Mao and Surian, 2010; May and Pryor, 2014; Olinde, 2015; Mao *et al.*, 2016a), quantification of bedload fluxes (Wilcock, 1997; Haschenburger and Church, 1998; Liébault and Laronne, 2008; Mao *et al.*, 2016b), travel distance distributions (Hassan *et al.*, 1991; Pyrcce and Ashmore, 2003; Chapuis *et al.*, 2014; May and Pryor, 2014; Hassan *et al.*, 2013), and monitoring the effectiveness of restoration measures (e.g. Kloesch *et al.*, 2008; Arnaud, 2012; MacVicar *et al.*, 2015). Two main types of tracers have been developed: passive types, which must be seen or sensed by an observer or detector, and active types, which emit waves or rays detected by a spectrometer or receiver (Hassan and Ergenzinger, 2003).

Passive tracers were first used by Einstein (1937), who tracked painted particles inside a flume. Almost thirty years later, Takayama (1965) and Leopold *et al.* (1966) pioneered the use of pebble tracking in rivers using painted natural clasts. At the same time, other researchers developed methods using radioactive tracers (Ramette and Heuzel, 1962) or ferric coatings (Nir, 1964). In the last decade, passive integrated transponder (PIT tags) borrowed from fish studies have become an essential tool for pebble tracking. This radio frequency identification (RFID) technology, which operates at a low frequency (134.2 kHz), offers numerous advantages, including: low cost, long operating life, unique identification codes, and a small tag size. The tracer receives the power for signal emission from electromagnetic waves transmitted by an antenna, which functions both as a power supplier and a signal receiver. The technique has been used mainly for the location of individual particles after flow events, and the estimation of critical discharge, and the critical shear stress of mobility above which particles are (Lamarre and Roy, 2008b; MacVicar and Roy, 2011; Liébault *et al.*, 2012; Chapuis *et al.*, 2014; Phillips *et al.*, 2013; Phillips and Jerolmack, 2014; Chapuis *et al.*, 2015; Dell’Agnese *et al.*, 2015; Imhoff and Wilcox, 2016). However, the low tracer recovery rates from deployments in very active or large rivers, present a significant drawback (see Table 2 in Chapuis *et al.*, 2015). Several technical studies have sought to understand the causes of low recovery rates (Cassel *et al.*, 2016), and therefore improve them. The detection range

(typically  $< 1$  m) of in-field maneuverable RFID systems, which depends on the tracer (length  $\leq 32$ -mm) and antenna sizes, as well as on the tracer orientation relative to the antenna plane (Lauth and Papanicolaou, 2008; Chapuis *et al.*, 2014; Arnaud *et al.*, 2015; Tsakiris *et al.*, 2015), may be shorter than the bedform or active layer thickness (Ferguson *et al.*, 2002a; Benelli *et al.*, 2012; Chapuis *et al.*, 2015). Also, the tag signals may be in collision, with the result that not all tags are detected separately when several are close to each other ( $d < 0.28$  m) within the antenna sensing field (Papanicolaou *et al.*, 2010; Chapuis *et al.*, 2014). Several anti-collision methods (e.g. the “Reader Talk First” protocol of the HiTAG RFID system; (Lauth and Papanicolaou, 2009; Papanicolaou *et al.*, 2010) involving techniques such as multiple spatial divisions, radio frequency or time domain repartitions, or signal treatment algorithms with uneven efficacies, have been deployed; however their use with the geomorphologist community has not been widespread. Thus, when tags are too close to each other, or too widespread, the time and effort required to increase recovery rates becomes very substantial, and the efficiency of such efforts is not yet well understood. Therefore, in practice, the general method to overcome this limit is to increase the number of particles tracked (see Arnaud *et al.*, 2017).

While the first technical uses of active tracers were proposed in 1972 (Dorey *et al.*), they were first deployed in rivers in 1989 (Chaco *et al.*, 1989; Ergenzinger *et al.*, 1989 in Hassan and Ergenzinger, 2003). These radio transmitters emitted at a frequency close to 150 MHz (in the very high frequency domain) and were equipped with a motion sensor. The first experiments were designed to track the movements and rest periods of individual particles during flow events, and to also locate particles after flow events. Nevertheless, the life of the radio transmitter batteries never exceeded one year, and tracer tracking required several antennas, with associated time and infrastructure costs. Examples of sediment transport studies using active tracers include the testing of the stochastic theory of bed load transport proposed by Einstein (Schmidt and Ergenzinger, 1992; Habersack, 2001), understanding of the spatial and temporal variability of bed mobility (McNamara and Borden, 2004; May and Pryor, 2014; McNamara *et al.*, 2008; Olinde, 2015), and calibration of numerical models of particle paths during flow events (Liedermann *et al.*, 2013). Active transmitters have been reported to offer great advantages over passive tracers, especially regarding the large detection ranges ( $> 100$  m), even when buried or immersed, which also allows the possibility of tracking during flow events (May and Pryor, 2014). Nevertheless, compromises were required on tracer size (23 and 80 mm in diameter and length respectively) and battery life (approximately 2 years) in the May and Pryor (2014) study. Signal collisions were handled

using radio frequency repartition techniques: when several tracers are deployed, their frequencies must differ slightly (typically of about 10 kHz) to avoid interference in the recorded signals. The typical receiver searches for, or receives, a signal at a certain frequency before switching to the next (May and Pryor, 2014). Thus, the larger the number of tags, the greater the time required for the receiver to scroll through all frequencies, and the lower the movement resolution is. Moreover, the methodologies applied remain confidential, especially concerning tracer position estimation using radio signals and its accuracy.

Another option for in-river pebble tracking with active tracers is the use of ultra-high frequency transponders (a-UHF). To our knowledge, these tracers have not yet been tested in such applications. They offer the advantages of signals that do not interfere with each other, a longer operating life (about 8 years for a signal impulse interval of 1.3 s), and present a larger detection range in comparison with passive transponders (about 80 m in the open field). Nevertheless, there are still several issues concerning the use of these tracers, which include: their size and shape, which limits the possibilities for their insertion into natural and small-sized pebbles; the possibility of receiving signals when a tag is immersed, as the UHF signal is normally strongly attenuated in water (Benelli and Pozzebo, 2013); their multipath propagation, which is sensitive to the water–air interface (Che *et al.*, 2011); and the accuracy of their estimated positions, as their signals can be detected over long distances. The propagations of electromagnetic waves through media such as water, air, or a sediment layer, is a function of their frequency, and depends on the respective permittivity and electrical conductivity of the medium. At the interfaces between two media, electromagnetic waves cross boundaries following the path of least resistance, from the medium of lower conductivity to the medium of higher conductivity, exhibiting propagation loss and refraction angle (Che *et al.*, 2011).

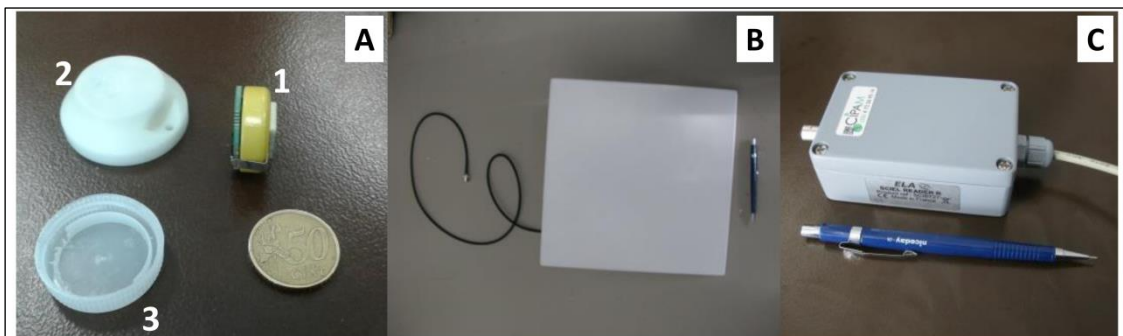
The objective of this study was therefore to assess the potential of a-UHF RFIDs solution for tracking pebbles in rivers. We investigated the abilities of an active transponder model emitting at 433.9 MHz, with waterproof housing dimensions of 30 mm in diameter and 15 mm in height, with our goals being to (1) describe the material used and its characteristics, including the overcoming of insertion issues with the development of artificial pebbles in which transponders are cast; (2) determine the maximum detection depth in water and a water saturated sediment layer; (3) characterize the tag positional accuracy; and (4) provide recommendations and in field protocols for pebble tracking. After reviewing other potential devices, we selected this technique for these additional tests, as we believed its potential

applicability to pebble tracking was high, and that it would facilitate monitoring of pebbles with a fairly small size for several years.

## 3.2 MATERIALS AND METHODS

### 3.2.1 Materials used

The RFID system used consisted of active tags, a reader and an antenna, which were all developed by ELA Innovation®. The COIN-HC tag model used was powered by batteries and functioned both as a transmitter and a responder (Figure 53 A), with emission of a beacon signal at a frequency of 433.92 MHz. The tag signal consisted of a tag identification number, a battery level alarm and a received signal strength indication (RSSI). The tag consisted of an electronic chip of cylindrical shape, with a diameter and thickness of 24 mm and 7 mm respectively. For protection, and to prevent disruption of radio wave emission, the electronic chip was packed in a waterproof housing, with at least 1 mm of empty space left around the base of the cylinder where the tag's antenna was situated. The tag operating life depended on the signal impulse interval selected by the user. The manufacturer ensures an operating life of about eight years for a signal emission every 1.3 s, which allows for long-term monitoring. The manufacturer also ensures a detection range in the open field of about 80 m, depending on the antenna used.



**Figure 1.** RFID material used in this study. (A) The COIN HC model; A1: The tag chip; A2: The commercial tag housing; A3: Smaller customized tag housing. (B) The SLENDER Antenna. (C) The SCIEL READER RU

### Figure 53. Matériel d'identification radiofréquence utilisé.

(A) les transpondeurs modèle COIN HC, (B) l'antenne Slender 1 et (C) le lecteur.

Notes : A1: la puce, A2: la coque de protection, A3: une solution de protection moins volumineuse.

The SLENDER I antenna model presented a semi-directional sensing field with an aperture angle of 80°, in which the isotropic gain was + 8 dBi (Figure 53 B). This allowed

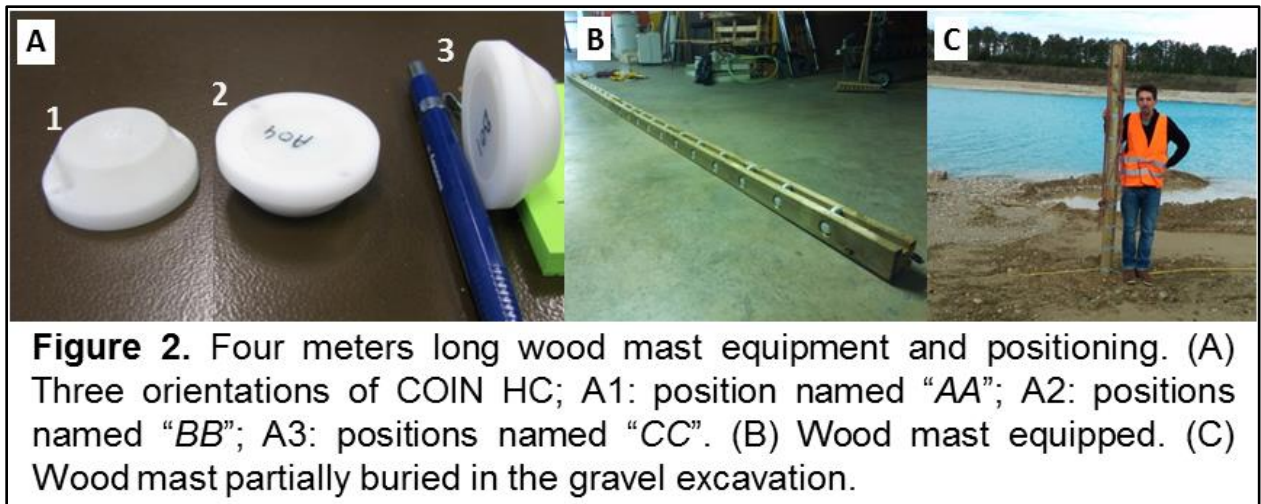
determination of the direction of improved signal detection. Its rectangular dimensions of 300 x 300 x 50 mm and mass of 1.5 kg permitted easy manipulation for altering orientation. The reader used was a SCIEL READER RU model (Figure 53 C), which was waterproof and powered by a USB cable connecting it to a digital tablet. It had a time domain repartition type anti-collision protocol, enabling simultaneous detection of several beacon signals. Tag signals, including identification number and RSSI, were visually relayed and recorded on the digital tablet using ELOG.exe software, which was also developed by ELA Innovation©. The software returned the RSSI in decimal units, which can be converted into the commonly used unit of decibels per milliwatt (dBm) using the equation (E1) provided by ELA Innovation©. The RSSI (from high to low signal intensity) range from 115 to 195 in decimal unit and from -56 to -106 in dBm.

$$\text{Equation : } \text{RSSI}_{(\text{dBm})} = -0.616 * \text{RSSI}_{(\text{decimal})} + 14.72 \quad (\text{E } 3.1)$$

### **3.2.2 Methods for evaluating the potential of a A-RFID for pebble tracking**

#### *3.2.2.1 Tests for assessing the maximal distance of detection (zmax)*

Ultra-high frequency (UHF) radio waves are known to be sensitive to the environment and surrounding medium in which they travel. Therefore, before deploying UHF active tags in a riverine environment, it is necessary to assess the propagation of radio waves and their maximal detection ranges in both water and water saturated sediment. The questions under investigation were: (1) How do water and saturated sediment environments affect radio wave propagation and maximum detection range? (2) How do interfaces (such as the water surface) between environments affect radio wave propagation and maximum detection range? (3) Does the maximum detection depth in water and saturated sediment environments remain sufficient (at least > 2 m) to permit a detection range greater than that accomplished with PIT Tags? To answer these questions, several tests were performed, in which tags were submerged or buried at various depths. Tag signals were recorded for at least 1 min, to attain several values of RSSI and investigate the possibility of RSSI variability due to multipath propagation of radio waves. Average RSSI values in dBm and their standard deviations were analyzed according to immersion or burial depths, and tag orientations (Figure 54 A).



**Figure 54. Equipement et positionnement du mât de 4 mètres de longueur.**

*Notes :* (A) les trois orientations de tags nommées AA (A1), BB (A2) et CC (A3) ; Le mât de bois équipé (B) et partiellement enfouis dans une gravière (C).

#### 3.2.2.2 Tests in water

We conducted experiments on tags immersed in two floodplain lakes. For the first lake, two operators were onboard an inflatable boat berthed on either side of the lake, and for the second lake, the boat was anchored. Since the electrical conductivity of water influences the propagation of radio frequencies (Benelli and Pozzebo, 2013), this was measured at the start and end of each experiment, and then averaged for each lake. The first operator maintained a tag at the desired immersion depth with the antenna in the correct position, while the second operator ensured signal registration.

The first test was performed in a shallow oxbow lake at Blyes (521  $\mu\text{S}/\text{cm}$  of average electrical conductivity in micro-Siemens per centimeter), on the Ain River, France (5°14'41.9" E; 45°50'26.2" N; maximal water depth observed = 170 cm), and focused on the impact of antenna position relative to the water surface. We used four tags (identification numbers: A8F, A97, AAF and A8E) molded into synthetic pebbles made of polyurethane resin and corundum (see details in Cassel *et al.*, 2016). Therefore, during immersion experiments, the tag orientation was unknown. Each pebble was tied to a thread and immersed one after the other, at water depths of 50, 80, 120 and 170 cm. We tested three antenna positions parallel to the water surface: floating on the water surface, and at 5 and 50 cm above the water level.

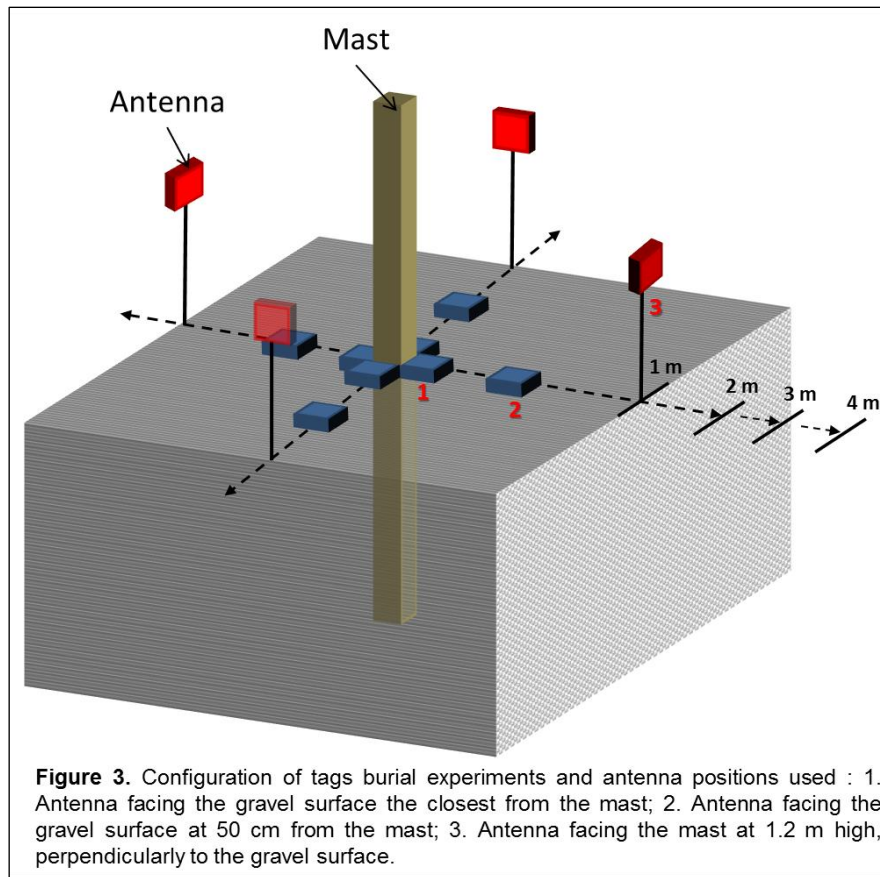
The second test was performed in a deeper lake at Miribel (340  $\mu\text{S}/\text{cm}$  of average electrical conductivity in micro-Siemens per centimeter), along the River Rhône, France (4°56'35.9" E; 45°48'19.5" N), and focused on measuring the RSSI decrease with immersion



depth (maximal water depth observed = 255 cm). The same four tags molded into synthetic pebbles were tied with threads and immersed one after the other at 50, 80, 120, 170, 220 and 255 cm water depths. The antenna was maintained 5 cm above the water and parallel to the water surface.

### 3.2.2.3 Tests in saturated sediment

The experiment was conducted in an operating gravel quarry at Péroutes, along the Ain River, France (5°10'39.9" E; 45°51'07.8" N). We equipped a 4.5 m-long wooden square-section mast with COIN-HC tags. Three tags were fixed to different sides of the mast (to present different orientations) at 20 cm intervals, for the whole length of the mast (Figure 54 A and B). An excavator was then used to partially bury the mast in the sediment mass to a maximal depth of 260 cm. The sediment mass was composed of an unsorted mix of sand-to-gravel sized limestone particles. According to Rollet (2007) and Rollet *et al.* (2008 and 2014), the D50 values of the surface and subsurface of the study area range from 28 to 20 mm and from 15.7 to 21.7 mm respectively. Elevation of the groundwater table was below 5 cm from the ground surface. Thus, to ensure all tags investigated were actually within the saturated sediment mass, we only show the results of tags buried at least 20 cm deeper than the ground surface. The tag signals were recorded with the antenna tested in a number of different positions on three sides of the mast. In the first two positions, the antenna was positioned facing the gravel surface, as close as possible to the base of the mast (Figure 3-1), and at 50 cm above the base (Figure 3-2). In a third position, the antenna faced the mast at a height of 1.2 m, perpendicular to the gravel surface. The distance between the mast and antenna was then progressively increased in steps of 1 m, until a distance of 8 m was reached (Figure 3-3).



**Figure 55. Configuration pour les tests de détection des tags en situation d'enfouissement.**

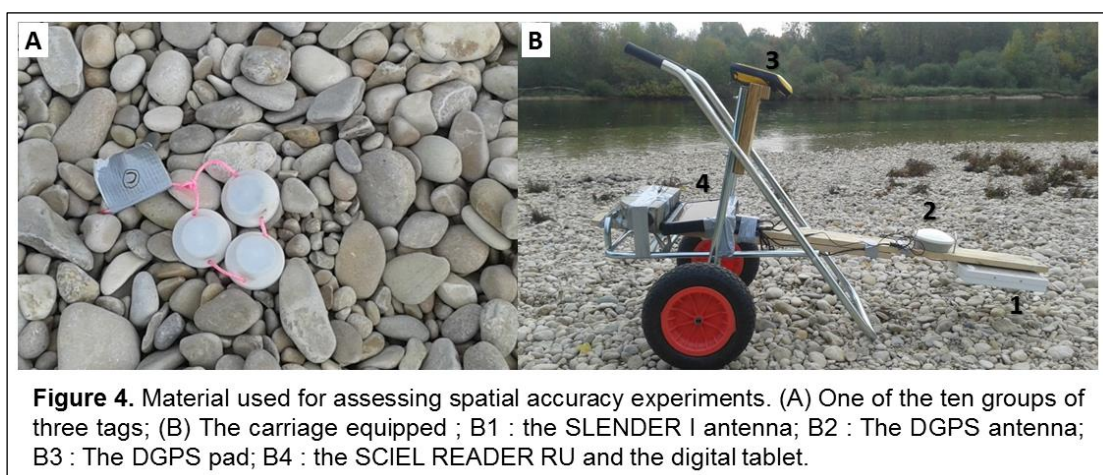
*Notes : 1, l'antenne fait face à la surface au plus près du mât, 2 : l'antenne fait face à la surface de gravier à 50 cm du mât et 3 : l'antenne fait face au mât à 1.2 m de hauteur et perpendiculairement la surface de gravier.*

#### 3.2.2.4 Tests for assessing planimetric accuracy

As the detection range of the COIN-HC tag was many meters, even when buried deeper than 1 m, new methodologies were required for the estimation of tag positions with a known accuracy in in-field surveys. Previous studies have used RSSI values to estimate either the distance between a tag and an antenna (Choi *et al.*, 2009), or the 2D (Joho *et al.*, 2009; Brchan *et al.*, 2012; Truijens *et al.*, 2014) or 3D (Ko, 2010; Parlak and Marsic, 2011) positions of tags displayed in relatively small areas (mainly indoor open spaces). These used several fixed antennas and reference tags for which the positions were known. The method developed in this study was based on the variability of the RSSI values in space according to the distance from tag position, and was measured with a single mobile antenna. It consisted of the spatial interpolation of the intensity of tag signals, performed using RSSI values and their geographic positions. The following were characterized to assess the efficiency of the method, (1) the accuracy of a tracer's position was estimated, (2) the variability of these estimates was assessed, and (3) the factors controlling the accuracy were examined. Such information was

essential to adapt the survey strategy and to accommodate the in-field efforts according to the study objectives. Accuracy was defined as the surface (2D) distance between the real tracer position (measured with a differential global positioning system; DGPS) and the estimated position. This was obtained using the calculation method defined below. Given the characteristics of the RFID tags used (signal impulse interval and detection range associated with RSSI), it was hypothesized that the accuracy of the position estimations depended on three factors: (1) tag signal impulse interval (the shorter the tag signal impulse interval, the more accurate the estimation of tracer position); (2) the in-field survey effort (the smaller the distance between surveyed passages, the more accurate the position estimation); (3) the operator velocity (the slower the operator walked, the more accurate the position estimation). As we considered this third parameter to be roughly constant (and thus negligible) during the experiment (as the same operator walked at the same speed), we focused on the effects of the signal impulse interval and the in-field sampling strategy.

In this regard, we proceeded with field tests using 30 transponders distributed in 10 groups of 3 transponders, with individual transponders set to emit beacon signals every 1.1, 2.2 or 4.3 s (Figure 56 A). They were positioned on an un-vegetated gravel bar along the Ain River (5°14'57.8" E; 45°56'36" N, surface: 5200 m<sup>2</sup>, length: 385 m, mean width: 13.5 m). The positions of the 10 tag groups were surveyed by DGPS, with a 10 cm precision after post-processing. These positions were considered as the genuine tag positions. Afterwards, the gravel bar was surveyed with a trolley equipped with a DGPS and the RFID system connected to a tablet computer (Figure 56 B).



**Figure 56. Matériel utilisé pour l'évaluation de la précision spatiale du positionnement des transpondeurs.**

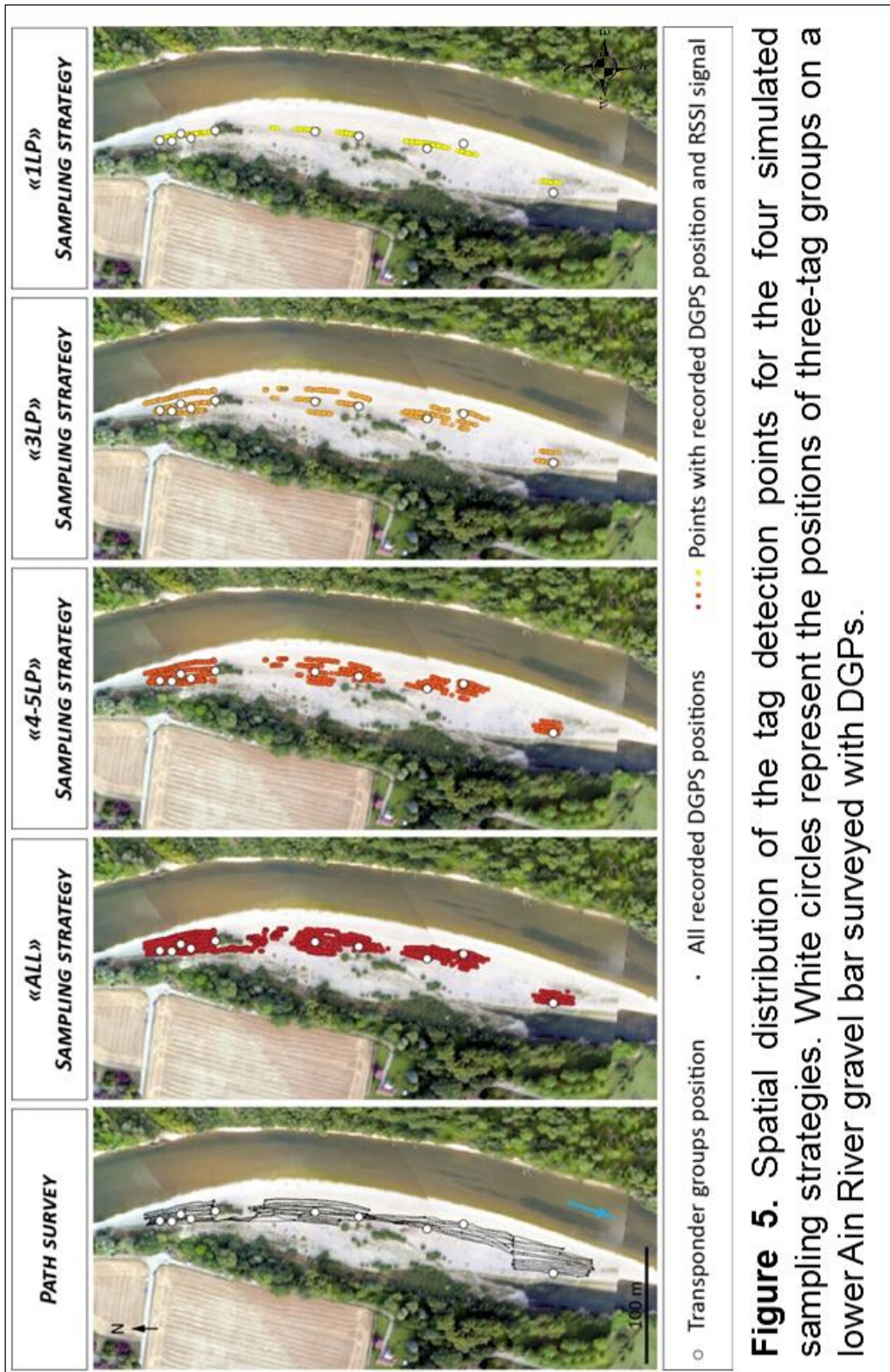
*Notes : (A) un des 10 groupes de trois transpondeurs ; (B) le chariot équipée de l'antenne Slender 1 (B1), de l'antenne du DGPS (B2), du pad du DGPS (B3), de la tablette numérique et du lecteur RFID (B4).*

The DGPS was fixed in line with the vertical axis of the antenna. The antenna was maintained nearly parallel to, and 0.5 m above, the surveyed surface. This antenna position permitted the focusing of its sensing field onto a relatively small circular area of equal sensitivity. The sampling process consisted of longitudinal passages, sub-parallel to the flow direction, and spaced at a mean distance of 1.9 m (locally, maximum reaches were 5 m). This allowed surveying of a total line distance of 5.2 km in 94 min, at an average operator speed of about 3.3 km h<sup>-1</sup>. The clock synchronization of the RFID and DGPS recordings was checked five times during the survey, and potential differences were noted, as the time data were later used to combine the information from both recordings.

After post-processing of DGPS data, the RFID and DGPS recordings were combined into a single data table, in which every second of the survey was associated with a geographic position and the RFID information (identification number and RSSI) when tags were detected. The data table was then duplicated and customized to mimic four different sampling strategies (Figure 57):

- The first strategy, named ALL, contained the data surveyed by all passages. It represented the maximal in-field sampling effort for the 5.2 km travelled in 94 min.
- The second strategy, named 4-5LP, contained the data surveyed by passages spaced at a mean distance of 4.1 m. With this strategy, 1.55 km was travelled, in an estimated time of 28 min at the average observed speed.
- The third strategy, named 3LP, contained the data surveyed by three passages, spaced at a mean distance of 7 m, and representing the outer limits and the central line of the surveyed area. With this strategy, 1.18 km was travelled in an estimated time of 21 min.
- The fourth strategy, named 1LP, contained survey data from the single central line of the surveyed area. It represented the minimal in-field sampling effort of 0.39 km travelled in an estimated time of 7 min.

Thus, from the first to the fourth sampling strategy, the data were progressively degraded to correspond with data collected with decreasing survey effort.



**Figure 5.** Spatial distribution of the tag detection points for the four simulated sampling strategies. White circles represent the positions of three-tag groups on a lower Ain River gravel bar surveyed with DGPs.

**Figure 57.** Distribution spatiale des points de détection des transpondeurs pour les quatre stratégies d'échantillonnage simulées.

Notes : les cercles blancs représentent les positions des 10 groupes de 3 transpondeurs sur un banc de graviers de la basse vallée de la rivière d'Ain.

The estimated positions were accomplished using ArcGIS. Two types of estimated positions were analyzed. The first corresponded with the position of the point of highest RSSI value and the second was obtained after a five step processing of RSSI values:

- Step 1: the RSSI values were spatially interpolated with the Inverse Distance Weighted tool (IDW).
- Step 2: the cells were reclassified into five RSSI value classes, the limits of which were the same for all tags and sampling strategies. For a single tag and sampling strategy, the number of RSSI classes available depended on the range of RSSI values observed.
- Step 3: the classified cells were converted into polygons.
- Step 4: the polygon centers were calculated using the “calculate geometry” tool of ArcGIS, which calculates the X and Y coordinates of the polygon barycenter by averaging the X and Y coordinates of the polygon vertices. For each tag, one position was estimated for the most intense RSSI class. When several polygons existed for a given RSSI class, the coordinates of the polygons were averaged.
- Step 5: the final estimated position given by the highest available RSSI class was accepted.

For each of the two types of estimated positions (sampled point exhibiting the highest RSSI, and coordinates of the center of the highest RSSI class polygons), the accuracy in meters was obtained by measuring the distance between the real and estimated positions of the tags. Thus, the lower the value, the better the estimated position was. All of the position accuracies were then analyzed according to the sampling strategy and signal impulse interval. Lastly, we analyzed the accuracy of the estimated position of a tag according to the number of times the tag was detected during the survey and its maximal signal intensity, to determine the respective influence of these two parameters.

In order to specify the maximal distance between passages while still ensuring the detection of all tags, the maximal surface distance of detection for each tag was measured. The tag signal impulse interval had an influence on the maximal distance of detection, with the higher the interval between tag signal impulses, the less probable the detection is when the operator reached the borders of the detection field. Therefore, we summarized 10 values of maximal detection distance per tag signal impulse interval, and retained the minimum value.

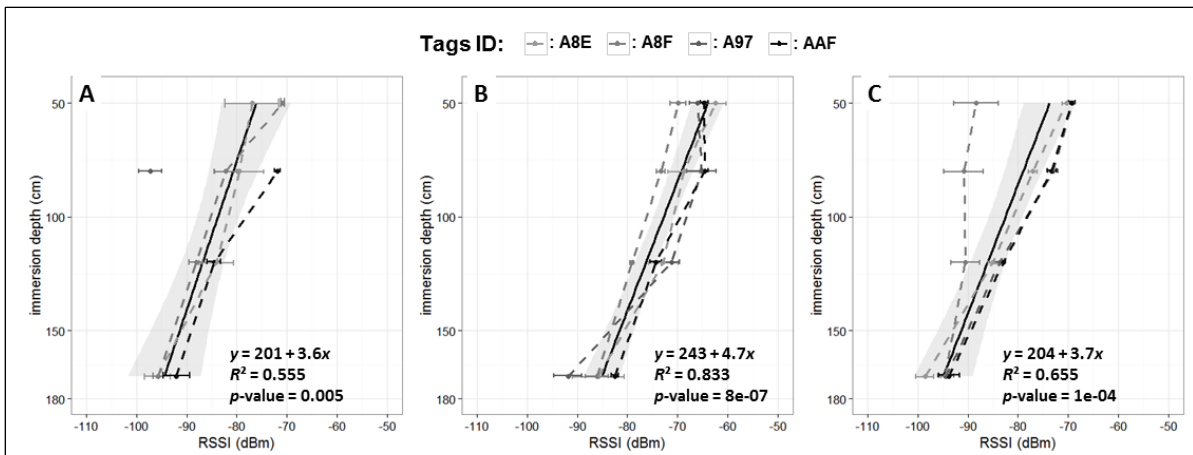
This corresponded to the maximal distance between passages, for which the detection of all tags could be ensured.

### **3.3 RESULTS**

#### **3.3.1 Maximum detection depth in water versus antenna position, tag position and site conditions**

During the first test conducted in the Blyes oxbow lake, tags were still well detected at the 170-cm water column depth, and we did not reach a depth which limited the detection of tags.

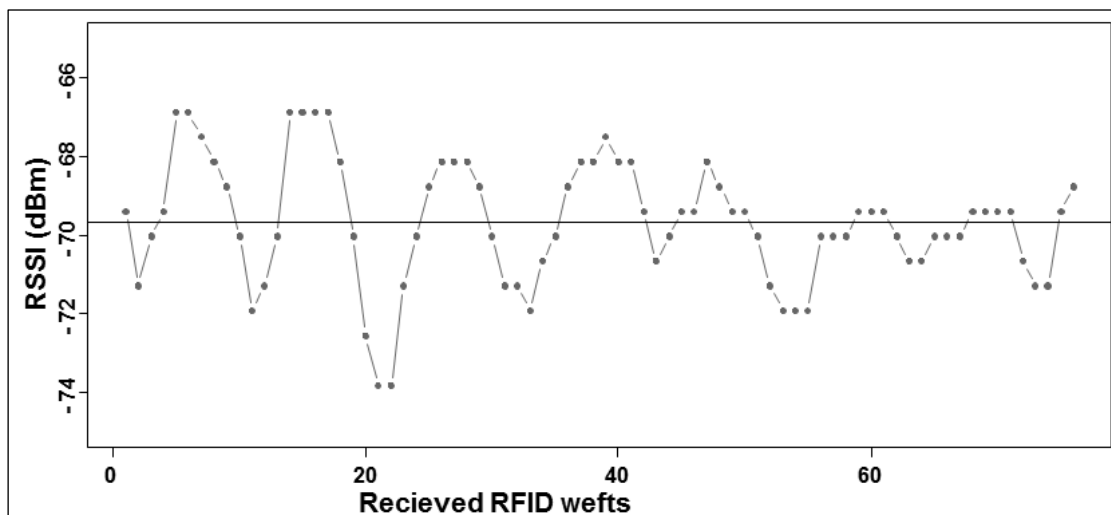
This test showed that the antenna position is critical for maximization of detection depth. With the three antenna positions tested, the RSSI values decreased according to water depth translating a decrease in tag signal intensity with increasing depth of immersion (Figure 6). However, the position of the antenna above the surface also influenced the tag signal intensity. The regression slopes ( $\alpha$ ) obtained are similar with the antenna floating (Figure 58-A) and 50 cm above the water surface,  $\alpha = 3.6$  and  $3.7$  respectively (Figure 58-C), but higher ( $\alpha = 4.7$ ) when the antenna was 5 cm above the water surface (Figure 58-B). Moreover, the observed RSSI values for the antenna positions floating or 50 cm above the water surface were generally lower than those observed with the antenna 5 cm above the water surface. This indicates that this latter position reduces attenuation of signal intensity compared with the first two positions mentioned. Furthermore, when the antenna was floating, or located 50 cm above the water surface, the coefficients of determination between the RSSI values and immersion depth were both lower ( $R^2 = 0.56$  and  $0.66$  respectively) than the one observed for the antenna position 5 cm above the water surface ( $R^2 = 0.83$ ).



**Figure 6.** Evolution of RSSI values of 4 tags according to immersion depths and antenna height above the water surface. (A) Antenna height = 0 cm; (B) Antenna height = 5 cm; (C) Antenna height = 50 cm. Points are mean values with their standard deviation, solid lines are regression laws for each of the tags, dashed segments link each tag mean values for the 4 investigated immersion depths and shaded area is the interval of confidence of 95%.

**Figure 58. Évolution des valeurs du RSSI des 4 transpondeurs en fonction de la profondeur d'immersion et de la hauteur de l'antenne par rapport à la surface de l'eau.**  
*Notes : (A) hauteur = 0 cm ; (B) hauteur = 5 cm et (C) hauteur = 50 cm.*

The standard deviations show significant variability in RSSI values. We expect this variability is mostly due to slight changes in antenna position during the survey, as strong wind conditions caused the boat to slowly move forwards and backwards over the intended position. Figure 59 shows an example of the RSSI variability observed in the Blyes oxbow lake; this variability was concomitant with movements of the boat around the mean position of the immersed tag.



**Figure 7.** Variation of RSSI for a measurement configuration. Black circles are RSSI value of a received RFID weft. Black horizontal line is the average RSSI value.

**Figure 59. Variation des valeurs du RSSI au cours d'une période de mesure.**



We therefore ran a second test in a deeper lake using the four previous tags and the best antenna position (5 cm above the water surface level; Figure 60) to compare inter-site differences and assess the maximum detection depth.



**Figure 8.** Evolution of RSSI values according to immersion depths for 2 different study sites. We used the same antenna located 5 cm above the water surface. Points are mean values, horizontal segments are standard deviations, dotted and dashed lines link a tag mean values of Blyes oxbow lake and Miribel lake measures respectively, solid lines present regression lines for each sites and shaded area is the interval of confidence of 95%.

**Figure 60.** Évolution des valeurs de RSSI en fonction de la profondeur d'immersion sur les deux différents sites d'étude.

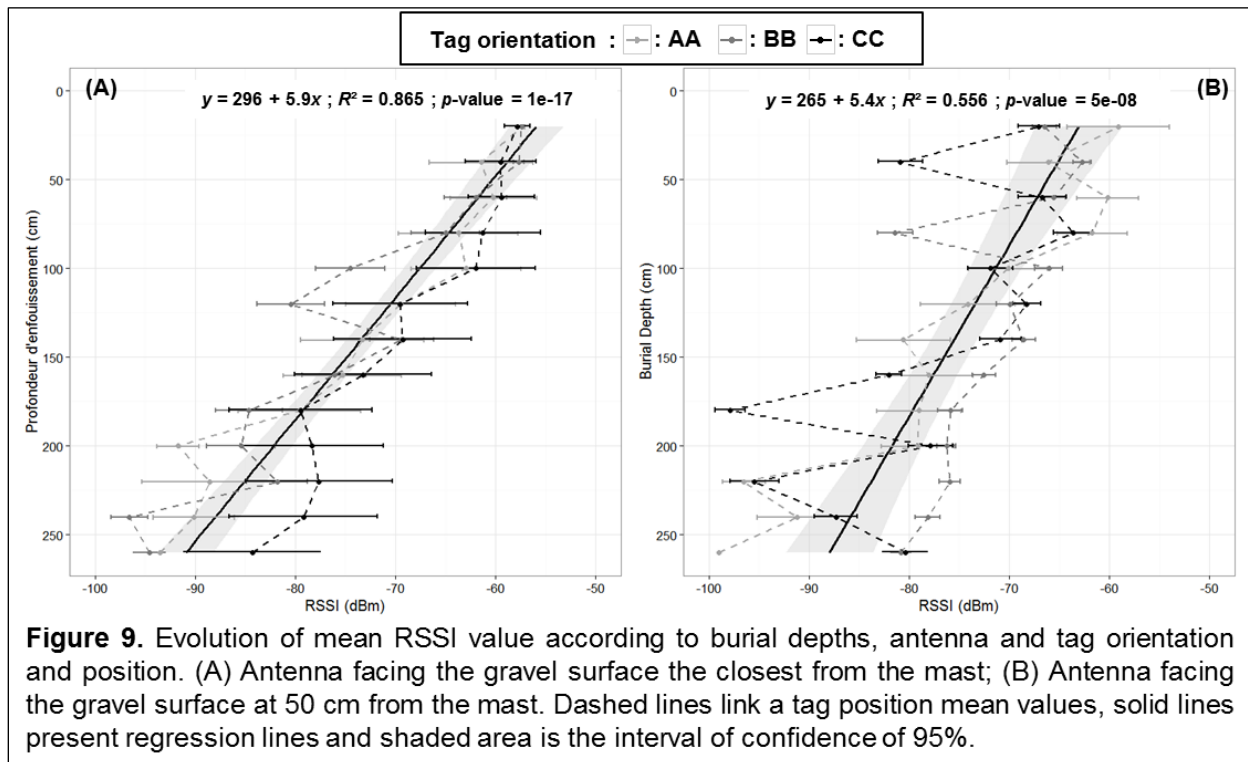
The values recorded at the bottom of the Miribel lake, at an immersion depth of 260 cm, were close to the upper limit of registrable values (an RSSI (dBm) of  $-105$ ):  $-89.3$ ,  $-96.9$ ,  $-97.2$  and  $-99.1$  dBm for tags A8F, A97, AAF and A8E respectively. This means that an immersion depth of 260 cm is very close to the maximal immersion depth that still allows these tags to be detected. Nevertheless, the RSSI values recorded in the Miribel lake were 4% higher than those in the Blyes lake for the same range of immersion depths (i.e. from 50 to 170 cm). This relates to a lower attenuation of signal intensity at the second site. The regression slopes for the Blyes and Miribel lakes are slightly different:  $\alpha = 4.7$  and  $5.7$

respectively, but confirm lower signal intensity attenuation at the Miribel lake. The variability in RSSI values will be discussed below.

In optimal conditions, tags can therefore be detected at water column depths of up to 260 cm. Furthermore, the position of the antenna significantly affects the trend in RSSI values according to water depth and RSSI signal intensity. The greatest potential for detection of deep tags is observed when the antenna is maintained 5 cm above the surface level.

### 3.3.2 Maximum detection depth in saturated sediment versus antenna and tag orientation and position

Experience in the saturated sediment at Pérourges, shows that whatever the antenna position, closest to the mast or at 50 cm distance from the mast (positions 1 and 2 respectively in Figure 55), RSSI values decrease with burial depth, again translating to a decrease in tag signal intensity with burial depth (Figure 61).



**Figure 9.** Evolution of mean RSSI value according to burial depths, antenna and tag orientation and position. (A) Antenna facing the gravel surface the closest from the mast; (B) Antenna facing the gravel surface at 50 cm from the mast. Dashed lines link a tag position mean values, solid lines present regression lines and shaded area is the interval of confidence of 95%.

### Figure 61. Évolution des valeurs moyenne du RSSI en fonction de la profondeur d'enfouissement, de la position de l'antenne et de l'orientation des transpondeurs.

Notes : l'antenne faisant face à la surface de gravier au plus près du mât (A) et à 50 cm du mât (B).

When the antenna was very close to the mast (Figure 9-A), the mean RSSI value rose slowly for the first 80 cm of burial, and tag orientation had no significant effect. The mean RSSI value then increased more quickly, especially for tags oriented in the return position (BB), whose values deviated from the horizontal (AA) and vertical (CC) orientations. The

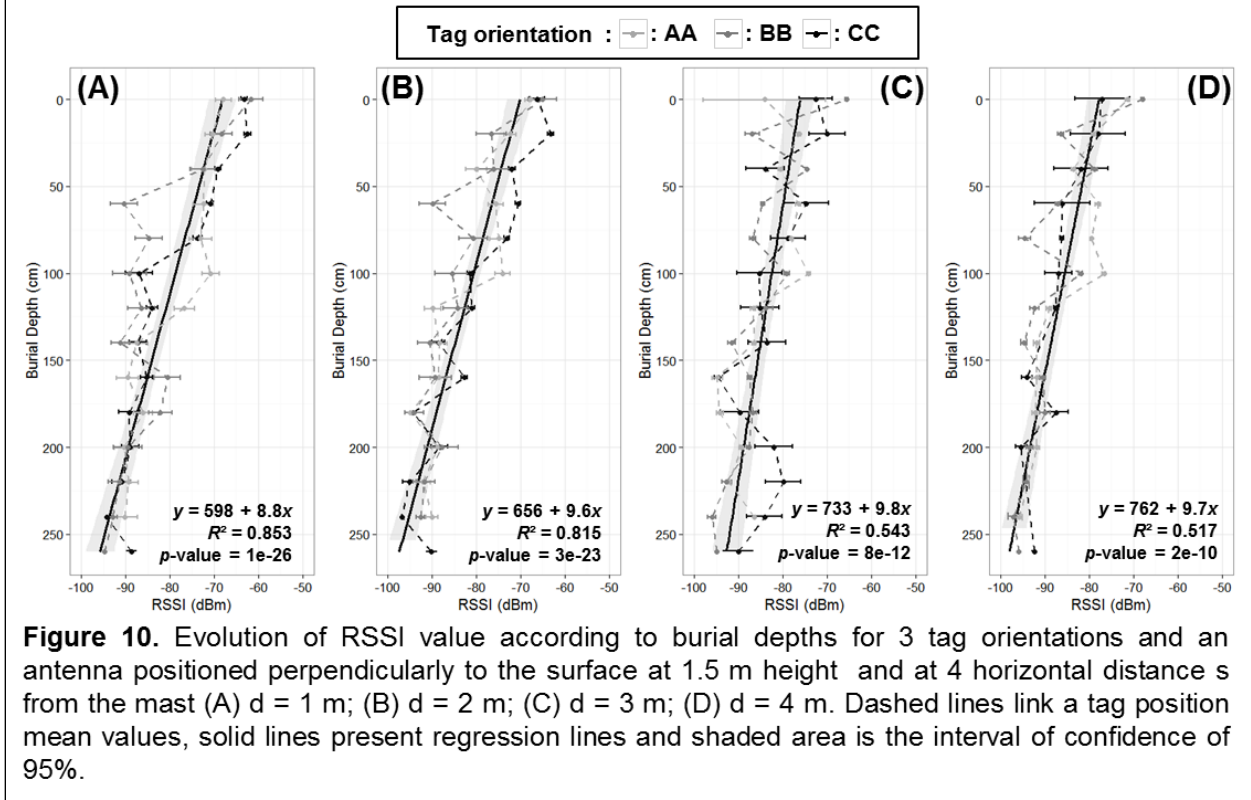
mean RSSI of the BB oriented tags recovered to a value close to that of the AA and CC oriented tags at a 140 cm depth. The mean RSSI values were then comparable until a burial depth of 200 cm. At this depth, the tag orientation presented very distinct values. At the maximum depth (i.e. 260 cm), the mean values of RSSI were  $-93.5$ ,  $-94.6$  and  $-84.3$  dBm for tags oriented in the AA, BB, and CC positions respectively. The standard error was influenced by tag orientation. Indeed, the standard deviations of the means were 2.4, 1.6 and 6.8 for AA, BB, and CC oriented tags respectively. The variability of RSSI values will be discussed below.

When the antenna was at a distance of 50 cm from the mast (Figure 61-B), the relationship between RSSI mean values and burial depth was weaker (Figure 61-B). Indeed, the RSSI could decrease strongly for 20 cm, before increasing in the next 20 cm as strongly as it decreased in the previous 20 cm. This was particularly true for CC oriented tags between 20 and 60 cm depths, and again between 160 and 260 cm burial depths. It was also the case, to a lesser extent, for the BB oriented tags between 20 and 60 cm and 60 to 100 cm depths, and for AA oriented tags below 200 cm depths. Furthermore, the standard errors around each mean value were about two times less with this antenna position than with the antenna closest to the mast.

Therefore, the relationship between RSSI mean values and burial depth is stronger when the antenna is closest to the mast. Indeed, the slope and coefficient of determination are higher ( $\alpha = 5.9$  and  $R^2 = 0.865$ ) than those with the antenna at 50 cm from the mast ( $\alpha = 5.4$  and  $R^2 = 0.556$ ). This signifies sensitivity in the position of the antenna relative to the exact vertical of the tag location, which influences the relationship between RSSI mean value and burial depth. The relationship linking average RSSI values and burial depth with the antenna above the tags is very similar to the law describing the relationship between RSSI and immersion depth at the Miribel lake. The first one is characterized by a slope of 5.9 and a coefficient of determination of 0.865, against values of 5.7 and 0.945 for the second.

When the antenna was perpendicular to the surface at a 1.2 m height, and observed at four distances from the mast (i.e. position 3 in Figure 55), the mean RSSI values showed a clear tendency for signal intensity to decrease with burial depth, although the residuals were still significant. The increase in distance between the antenna and the mast induces a significant decrease in RSSI values (from  $-62.3$  to  $-77.7$  dBm) of the tags buried close to the gravel surface, while the RSSI values of tags buried more deeply (i.e. 200 cm depth) change more slowly (from  $-90.0$  to  $-96.2$  dBm). Thus, the difference in RSSI values between tags

buried shallowly or deeply, reduces with the increase in distance between the antenna and the mast. Therefore, the slope of the regression line characterizing the relationship between RSSI mean values and burial depth increases. For the four distances investigated, tags buried between 0 and 200 cm were all detected (Figure 62).

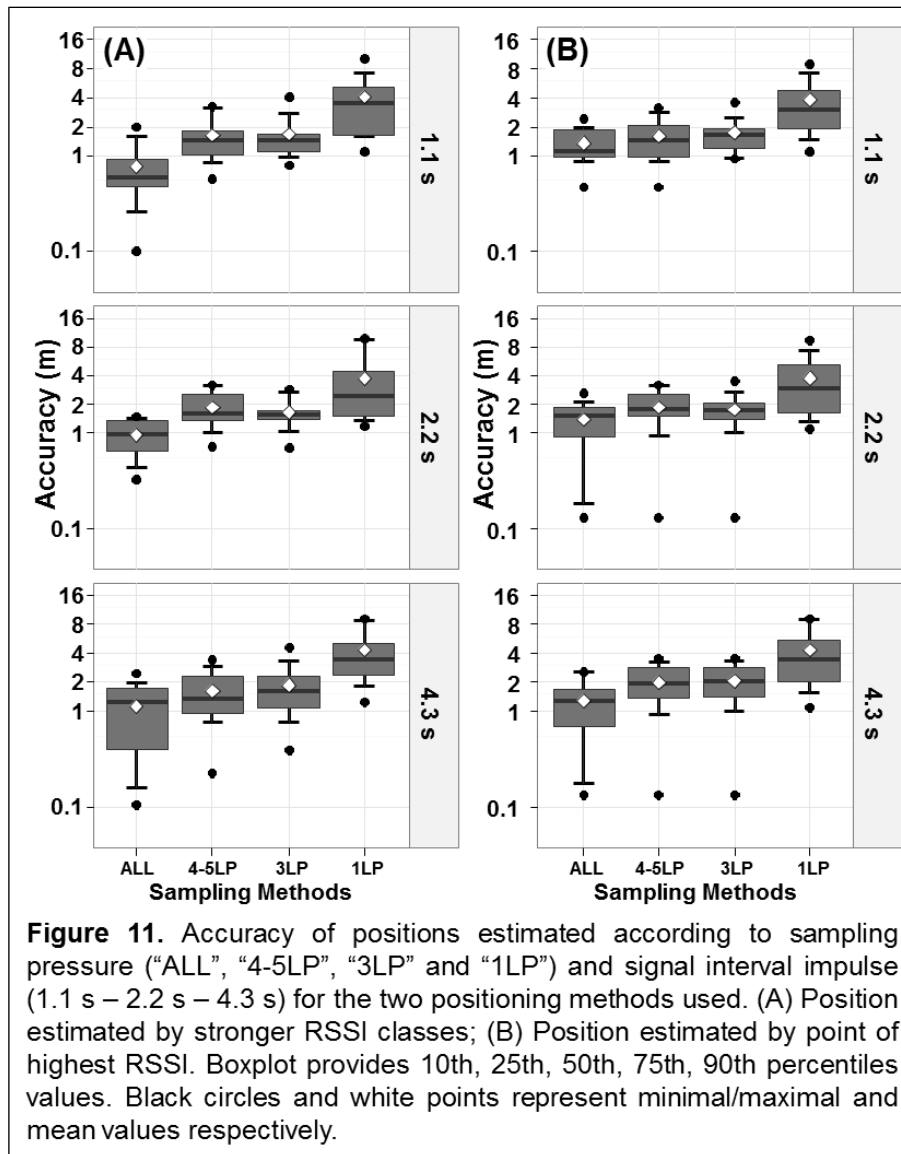


**Figure 62.** Évolution des valeurs moyennes du RSSI en fonction de la profondeur d'enfouissement, de l'orientation des transpondeurs et de la distance au mât avec l'antenne perpendiculaire à la surface de gravier.

Notes : Distance entre le mât et l'antenne = 1 m (A), d = 2m (B), d = 3m (C) et d = 4 (D).

### 3.3.3 Planimetric position

Figure 63 presents the results of tag position accuracy for both position estimation methods: the spatial interpolation process (Figure 63 A), and the point of highest signal intensity (Figure 63 B). The results are presented according to the four sampling densities and the three signal impulse intervals. The accuracy of the positions obtained using the RSSI spatial interpolation process (mean = 2.1 m, SD = 1.21) was slightly, but significantly (Mann-Whitney test, p = 0.098), better than obtained using the point of highest intensity (mean = 2.24 m and SD = 1.07). However, the accuracy obtained using each position estimation method was significantly related to signal impulse interval, and even more to sampling density, especially with the RSSI spatial interpolation method.



**Figure 63. Précision des positions estimées en fonction de la stratégie d'échantillonnage, de l'intervalle d'émission du signal and de la méthode d'estimation de la position.**

*Notes : méthode d'estimation de la position (A) par interpolation spatiale du signal ou (B) au point d'intensité du signal la plus forte.*

With the RSSI spatial interpolation method, the mean accuracies obtained with signal impulse intervals of 1.1, 2.2 and 4.3 s, regardless of sampling density, were similar: 2.02 m (SD = 2), 2.06 m (SD = 1.94) and 2.22 m (SD = 2.02) respectively. The slight differences between mean values are not significant (Tableau 18). A similar observation can be made when the differences in accuracy between the three signal impulse intervals for a given sampling density are examined (Tableau 19 and Figure 63 A).

The average accuracies obtained with ALL, 4-5LP, 3LP and 1LP, regardless of the signal impulse interval, are much more varied: 0.95 m (SD = 0.62), 1.70 m (SD = 0.90), 1.73 m (SD = 0.95) and 4.02 m (SD = 2.89) respectively. The differences are statistically

significant, except between the 4-5LP and 3LP sampling densities (Tableau 20). However, the differences in accuracy between sampling densities at a single signal impulse interval, were not systematically significant (Tableau 21 and Figure 63 A). Furthermore, when the signal impulse interval increased, the number of significant differences decreased (Tableau 21 and Figure 63 A).

Table 1: Statistical analysis of the differences between estimated position accuracy obtained for the three signal impulse intervals, regardless of the survey strategy (Mann-Whitney test p values).

	RSSI interpolation method			Max RSSI method		
	1s	2s	4s	1s	2s	4s
1s		0.56	0.44		0.53	0.29
2s			0.63			0.75
4s						

**Tableau 18. Analyses statistiques des différences entre les précisions des positions estimées obtenues pour les intervalles d'émissions du signal indépendamment de la stratégie d'échantillonnage.**

*Notes: p-value du test de Mann-Whitney.*

Table 2: Statistical analysis of the differences between estimated position accuracy obtained for the three signal impulse intervals (Mann-Whitney test). Differences are tested for each sampling density.

	RSSI interpolation method			Max RSSI method		
	ALL - 1s	ALL - 2s	ALL - 4s	ALL - 1s	ALL - 2s	ALL - 4s
ALL - 1s		0.27	0.47		0.88	0.91
ALL - 2s			0.68			0.55
ALL - 4s						
	4-5LP- 1s	4-5LP- 2s	4-5LP- 4s	4-5LP- 1s	4-5LP- 2s	4-5LP- 4s
4-5LP - 1s		0.47	0.91		0.33	0.34
4-5LP - 2s			0.47			1
4-5LP - 4s						
	3LP - 1s	3LP - 2s	3LP - 4s	3LP - 1s	3LP - 2s	3LP - 4s
3LP - 1s		0.68	0.76		0.76	0.36
3LP - 2s			0.85			0.55
3LP - 4s						
	1LP - 1s	1LP - 2s	1LP - 4s	1LP - 1s	1LP - 2s	1LP - 4s
1LP - 1s		0.68	0.79		0.94	0.71
1LP - 2s			0.47			0.71
1LP - 4s						

**Tableau 19. Analyses statistiques des différences entre les précisions des positions estimées obtenues pour les trois intervalles d'émission du signal and testées pour chaque méthode d'échantillonnage.**

*Notes: p-value du test de Mann-Whitney.*

As expected, the results obtained using the ALL sampling strategy were the most accurate, while those obtained with the 1LP method were the least accurate. The results

obtained with the 4-5LP and 3LP sampling densities were very similar for any of the position estimation methods or tag signal impulse intervals. Also as expected, the positions estimated by combining the shortest signal impulse interval (1.1 s) with the highest sampling density (ALL) were the most accurate, with an average accuracy of 0.76 m (SD = 0.58; Figure 63 A).

With the position estimation method using the point of highest intensity, the mean accuracy obtained with signal impulse intervals of 1.1, 2.2 and 4.3 s, regardless of sampling strategy, did not result in significant differences: 2.11 m (SD = 1.73), 2.21 m (SD = 1.78) and 2.41 m (SD = 2.01) respectively (Tableau 18). The average accuracy obtained with ALL, 4-5LP, 3LP and 1LP, regardless of the signal emission recurrence, demonstrated greater contrasts. The values were 1.34 m (SD = 0.73), 1.82 m (SD = 0.94), 1.85 m (SD = 0.90) and 3.96 m (SD = 2.70) respectively. Furthermore, the differences were significant, except between the 4-5LP and 3LP strategies (Tableau 20).

The 1LP sampling strategy produced position estimations that were significantly less accurate than the other sampling strategies (Figure 63 B and Tableau 20). Furthermore, with the point of highest intensity positioning method, the differences in the mean accuracies of the different signal emission delay sub-sets were almost all negligible and insignificant, even for the ALL sampling strategy (Figure 63 B and Tableau 19). With this sampling strategy, the average accuracies were 1.35 m (SD = 0.60), 1.39 m (SD = 0.81) and 1.27 m (SD = 0.85) for signal emission recurrences of 1.1, 2.2 and 4.3 s respectively. Thus, with the position estimation method using the point of highest intensity, the increase in the frequency of tag signal emissions did not significantly improve the positioning accuracies, even with the most exhaustive sampling strategy (Tableau 19).

Table 3: Statistical analysis of the differences between estimated position accuracy obtained for the four sampling densities, regardless of the signal impulse interval (Mann-Whitney test, p values).

	RSSI interpolation method				Max RSSI method			
	ALL	4-5LP	3LP	1LP	ALL	4-5LP	3LP	1LP
ALL		0.00014	0.0006	< 0.0001		0.08	0.046	< 0.0001
4-5LP			0.91	0.00014			0.85	0.00071
3LP				0.00014				0.0014
1LP								

**Tableau 20. Analyses statistiques des différences entre précisions des positions estimées obtenues pour les 4 stratégies d'échantillonnage indépendamment de l'intervalle d'émission du signal.**

*Notes: p-value du test de Mann-Whitney.*

Table 4: Statistical analysis of the differences between estimated position accuracies obtained for the four sampling densities (Mann-Whitney test, p values). Differences are tested with regard to signal impulse interval.

RSSI interpolation method				Max RSSI method				
	1s - ALL	1s - 4-5LP	1s - 3LP	1s - 1LP	1s - ALL	1s - 4-5LP	1s - 3LP	1s - 1LP
1s - ALL		0.031	0.011	0.001		0.73	0.38	0.008
1s - 4-5LP			0.82	0.017			0.62	0.017
1s - 3LP				0.017				0.031
1s - 1LP								
	2s - ALL	2s - 4-5LP	2s - 3LP	2s - 1LP	2s - ALL	2s - 4-5LP	2s - 3LP	2s - 1LP
2s - ALL		0.011	0.014	0.002		0.31	0.47	0.045
2s - 4-5LP			0.68	0.19			0.76	0.2
2s - 3LP				0.12				0.15
2s - 1LP								
	4s - ALL	4s - 4-5LP	4s - 3LP	4s - 1LP	4s - ALL	4s - 4-5LP	4s - 3LP	4s - 1LP
4s - ALL		0.43	0.27	0.002		0.16	0.1	0.004
4s - 4-5LP			0.73	0.009			0.94	0.059
4s - 3LP				0.43				0.082
4s - 1LP								

**Tableau 21. Analyses statistiques des différences entre les précisions des positions estimées obtenues pour les 4 stratégies d'échantillonnage en fonction des intervalles d'émission du signal.**

*Notes: p-value du test de Mann-Whitney.*

In summary, whatever the positioning method, the accuracy appears to be more sensitive to the sampling effort than to the tag signal impulse interval or position estimation method. Nevertheless, with the RSSI spatial interpolation method, the accuracy increased with the shorter interval between signal emissions, provided that the sampling strategy was sufficiently exhaustive (i.e. the ALL sampling strategy). This was not the case with the highest intensity method. For this reason, the best positioning estimations obtained with this method (mean = 1.27 m and SD = 0.85) were less accurate than those obtained using the RSSI spatial interpolation method (mean = 0.76 m and SD = 0.58). Thus, the two position estimation methods only differ significantly with the most exhaustive sampling strategy, and the shortest signal impulse interval (Table 5).

Table 5: Statistical analysis of the differences in positioning accuracy obtained with the highest signal intensity method and the RSSI interpolation method (Mann-Whitney test, p values). The differences between each combination of sampling density and signal impulse interval were tested.

	ALL	4-5LP	3LP	1LP
1	0.045	0.970	0.734	0.970
2	0.104	0.791	0.571	0.791
4	0.734	0.385	0.571	0.970

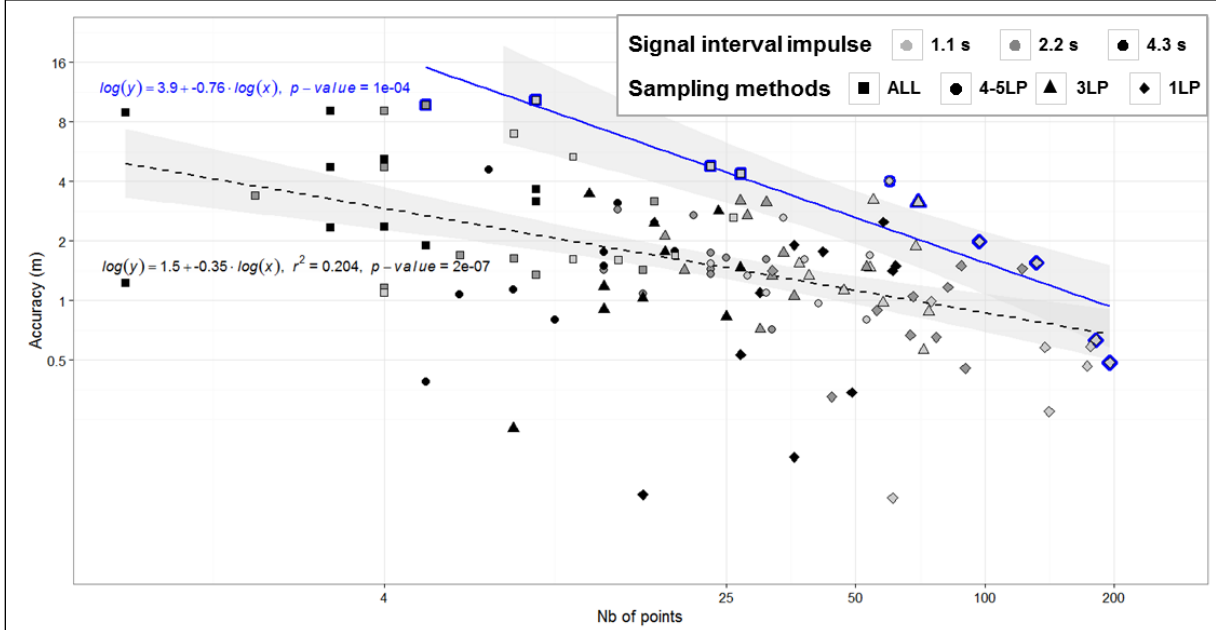
**Tableau 22. Analyses statistiques des différences entre les précisions des positions estimées par interpolation spatiale et par point d'intensité la plus forte.**

*Notes: Les différences sont testées pour chaque combinaison de méthode d'échantillonnage et d'intervalle d'émission du signal. p-value du test de Mann-Whitney.*



In order to generalize findings, we now focus on the RSSI spatial interpolation method and compare all accuracies independently of the sampling density and signal impulse interval categories.

Figure 64 presents the accuracy of each tag according to the number of locations in which it was detected. The statistical relationship between accuracy and number of detected locations is characterized by a low coefficient of determination ( $R^2 = 0.128$ ), but also by a statistically significant negative slope ( $\alpha = -0.018$  and  $p\text{-value} < 0.001$ ). This means that the number of detected locations influences the positioning accuracy, but also that the number of detected locations is not the only factor influencing accuracy. A large number of detections for a given tag would increasingly influence the accuracy of the tag positioning if its RSSI presented a wider range of values (ideally, well distributed in the detection area to present gradients of intensity).



**Figure 12.** Accuracy of positions estimated by RSSI spatial interpolation according to the number of points the tag is detected. Black dashed line represent the statistical relation based on the whole sample. Blue solid line represent the upper limit. Point shapes and colors describe the sampling methods (“ALL”, “4-5LP”, “3LP” and “1LP”) and signal interval impulse (1.1 s – 2.2 s – 4.3 s) respectively. Points surrounded of blue represent local maximums used for upper limit regression.

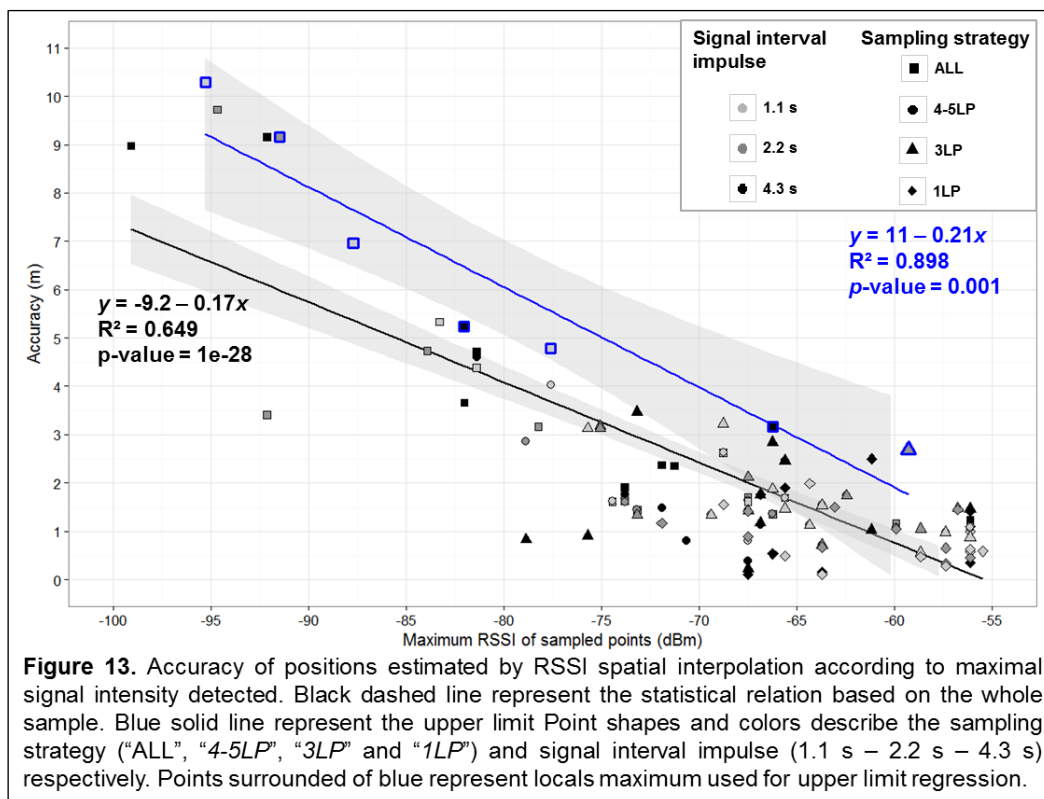
**Figure 64. Précision des positions estimées par interpolation spatiale du RSSI en fonction du nombre de détections.**

*Notes : les couleurs et formes des points indiquent respectivement les intervalles d’émission du signal et les méthodes d’échantillonnage. Les modèles et droites bleu et noir sont établis respectivement avec les points dessinant l’enveloppe supérieur du nuage de point ou avec l’ensemble des points du nuage.*

The maximal intensity detected for a tag partially includes this information. Indeed, a tag signal is usually recorded several times (depending on the impulse interval) as the

operator approaches the location of maximum intensity detection. Nevertheless, the higher the number of detection points, the better the estimated position. The upper limit of the point cloud envelope provides information on the lowest accuracy of tag position estimation according to the number of locations detected.

Figure 65 presents the accuracy of each tag according to the maximal signal intensity detected. The statistical relationship between accuracy and maximum signal intensity is characterized by a higher coefficient of determination ( $R^2 = 0.649$ ) than the one characterizing the relationship between accuracy and the number of detected locations. It is also characterized by a statistically significant slope ( $\alpha = -0.17$  and  $p\text{-value} < 0.001$ ). Thus, the maximal signal intensity detected, more strongly influences the position estimations than the number of detection locations. The higher the RSSI observed, the higher the maximal tag signal intensity, and the more accurate the position estimation is. Lastly, as for the relationship between accuracy and number of points, the upper limit of the detection location cloud envelope provides information about the lowest accuracy of tag position estimation, according to the maximal signal intensity.



**Figure 65. Précisions des positions estimées par interpolation spatiale de l'intensité du signal en fonction du point d'intensité la plus forte détectée.**

*Notes : les couleurs et formes des points indiquent respectivement les intervalles d'émission du signal et les méthodes d'échantillonnage. Les modèles et droites bleu et noir sont établis respectivement avec les points dessinant l'enveloppe supérieur du nuage de point ou avec l'ensemble des points du nuage.*

The maximal planimetric detection range of the tags was 15.9 m, 14.1 m and 12.9 m for signal impulse intervals of 1.1 s, 2.2 s and 4.3 s, respectively. This means that if an operator respects this interval distance between parallel passages, they are almost certain to detect tagged particles deposited at the surface in at least two passages. If the active layer of the study site is expected to be thicker (e.g.  $\approx 2$  m), the distance between passages must be reduced ( $\approx 4$  m).

### **3.4 DISCUSSION AND RECOMMENDATIONS**

#### **3.4.1 Advantages and limitations**

The active ultra-high frequency RFID system used in this study presents a number of advantages for in-river pebble-tracking, particularly in comparison with low-frequency PIT tags. Firstly, the wide detection range means that within a radius of 4 m, a tag signal can be detected down to a saturated sediment depth of 260 cm, whatever the tag's position and orientation. Secondly, the system can be used with anti-collision protocols, as even if they are very close, all tags can be sensed. These two properties will facilitate high detection rates for seeded and submerged tags. As a consequence, the time needed for surveys is much shorter than for PIT tags, and the field effort is thus reduced. As the position accuracy can be estimated from the number of times a tag signal is recorded, it is possible to design sampling strategies and adjust in-field efforts, according to the positioning accuracy required for the purposes of the study. The technique also presents new opportunities for studying wider rivers, such as braided rivers, for which pebble tracking was inconceivable until now.

The limits of this RFID system include: (1) the transponder size, which limits the lower size range of tracked particles (b-axis  $> 32$  mm) and requires them to be inserted into synthetic pebbles or large natural cobbles; (2) the relatively high cost of transponders (about 40 €), although this should be balanced against the improved recovery rates; (3) the detection range when the tag is deeply immersed in water (below 2 m), although it may be possible to overcome this by using an antenna housed in a submersible device and deployed from a boat; (4) the multipath propagation of radio waves induces a certain variability in the recorded RSSI for a specific measurement configuration (Che *et al.*, 2011), and this can compromise the possibility of easily determining the scour depth from the RSSI value.

Finally, with the detection method developed in this study, the active ultra-high frequency RFID system is currently very well suited to pebble tracking in rivers such as braided rivers, with large emerged bare surfaces. Further methodological tests in submerged

areas are needed before detection is possible in single thread rivers with water depths of more than 2 m. We also still need to test for the effects of two successive environments (the water column above saturated gravel) on the maximum detection depth. This information is required for the design of survey protocols in such flow channels.

### **3.4.2 RSSI variability for immersed or buried tags**

RSSI values observed during both immersion tests show significant variability for a given tag (for a given depth and site) or between tags (for a given depth and site). Such variability is due to either wind conditions, which disturbed some of the tag signal measurements, or to the tag position or orientation, which cannot be controlled (at least when the tag is immersed).

We also suggest that the signal variability observed between the two sites for the same range of immersion depths, can be related to differences in signal attenuation resulting from differences in electrical conductivity between the lakes; lower electrical conductivity attenuates radio frequency propagation (Benelli and Pozzebo, 2013). However, in our study, we observed the opposite. The site with the lowest electrical conductivity: Miribel lake (equal to about 65% of that measured in the Blyes lake), exhibit RSSI values 4% higher than those measured in the Blyes lake.

During the burial experiments, we also observed considerable variability in the signal measurement, which cannot be attributed to either the wind or the uncontrolled tag orientation:

- The variability within the RSSI values of a given tag is suspected to be the consequence of the multipath propagation of the radio waves. Each path has a unique tag signal attenuation rate; therefore, each signal emitted can borrow a slightly different path of least resistance, from which a specific RSSI value is determined. We expected this phenomenon and had hoped that averaging RSSI values would smooth these variations.
- The variability in recorded tag orientations is probably induced by a semi-directional emission of the tag signal. This could be checked by measurement of the radiation pattern from a tag's signal.

The worst consequence of this is that we cannot expect to get a good vertical position on the tag, even if it could be located with a high planimetric accuracy. This could limit the opportunities for using this technique to detect the average scour layer, and determine the

bedload transport as a simple product of the mean distance travelled and mean burying depth of tracked particles.

### **3.4.3 Positioning accuracy.**

Our results show that the positioning accuracy (from less than a meter to about four meters on average) is a function of the number of times/positions a tag is detected, and of the highest signal intensity recorded at one of these points. As the influence of the signal impulse interval on the positioning accuracy was limited in our test configuration (very short impulse intervals are only necessary for achieving accuracies below 1 m), the operator will have to make a compromise between the accuracy required, the follow-up duration and the in-field sampling efforts. Similarly, the choice of positioning method depends on the accuracy required by the operator. The RSSI spatial interpolation method can be more accurate, but only if the shorter tag signal impulse interval (1.1 s) is used together with the more exhaustive sampling strategy (ALL). Nevertheless, the method using the point of highest signal intensity allows for faster data processing, with accuracies very close to those obtained from the RSSI spatial interpolation method with signal impulse intervals above 1.1 s. Although the 1LP sampling strategy produced significantly less accurate position estimates, these can nevertheless still be considered as reasonable, depending on the expected distance of travel of the particles during a flood event (i.e. spatial accuracy of a few meters is still reasonable compared to the mean travel distances observed during flood events by previous researchers working with PIT-tags).

Previous studies using active tracers have reported similar spatial accuracies, although these may have been a little lower than the best mean accuracy ( $\pm 0.76$  m) obtained in our study. Ergenzinger and Schmidt (1990) and Busskamp (1994) give values of  $\pm 2$  m for particle tracking during flow events, with measurements made by stationary antennas installed on the river bank. For detection of particles after a transport event, May and Pryor (2014) indicated an estimated accuracy of 4 m<sup>2</sup>, obtained with a mobile directional antenna. Nevertheless, these values are neither related to in-field sampling strategies, nor to the time needed for particle location after a flow event. Thus, comparison with our accuracy values remains limited.

Positional accuracies of between 0.1 m and 1.0 m, reported in studies using passive RFID technology (see Table 1 in Chapuis *et al.*, 2014) are in the same range as the best accuracy obtained in our study. Moreover, the best (0.76 m) and mean (2.1 m) accuracies obtained in this study respectively represent 0.04 % to 0.08 % and 0.08 % to 2 %, of the

maximal in-river travel distances reported in previous studies by Chapuis *et al.* (2015). The variability in accuracy reported in the literature for PIT-Tags is due to variation in the antennas and chip sizes, in in-field sampling efforts, technical properties of the detection system, study purposes, river system size, and the dynamical properties of the river (Chapuis *et al.*, 2014; Hassan and Roy, 2016). For example, the highest accuracies (less than 0.5 m) resulted from the use of small antennas with small sensing fields, whose objective was to overcome or reduce the problem of tag signal collision. The lowest accuracies resulted from the need to maximize the antennal detection surface by designing new sizes and shapes of antennas in order to reduce the in-field effort in quite large rivers. Active UHF technology proposes different methods for overcoming signal collision, offering wider detection ranges and signal intensity measures. Thus, the needs of this technology are different; it relies on data processing for position estimations at a known accuracy, and requires new sampling strategies to be designed.

#### **3.4.4 Sampling and in-field efforts.**

The sampling method used in this study was directly derived from a sampling method used to track particles equipped with PIT tags. We tested four different sampling densities reproducing different in-field tag research efforts. We showed that an increase in accuracy is not linearly proportional to the sampling effort. Indeed, the difference in accuracy between the 3LP and 4-5LP sampling densities was systematically insignificant, while a third more sampling effort was required for the latter sampling strategy. This arouses interest in a sampling density in which the distance between passages does not exceed the maximal planimetric detection range of the tags. This distance is the radius of a disk-shaped surface in which the tag is detected. If the operator respects this interval distance between passages, they are sure to detect the tag in the course of at least two passages if it is located at the surface. In this study, this distance was found to be 15.9 m for a 1.1 s recurrence interval, 14.1 m for 2.2 s and 12.9 m for 4.3 s. Nevertheless, it is important to note that the tag radio signal–distance relationship is a function (among others) of the height of the antenna above the ground, which influences both the RSSI, and the ground surface area of the antenna field of best detection. Therefore, if future operators use different antenna heights, they will have to characterize the maximal planimetric distance of tag detection, and quantify the relationship between positional accuracy and the number of detection locations, as presented in this study. Thus, they will be able to design a sampling strategy and adjust in-field efforts according to the positioning accuracy required for the purposes of their study.

### **3.4.5 Recommendations and potential developments.**

Determination of the position of UHF active tracers can only be achieved if both RFID and DGPS clocks are synchronized. In this study, the recordings of the DGPS and RFIDs were manually synchronized and separately recorded. This complicated data processing and also introduced a risk of offset in the recordings. For future applications, direct recording of both DGPS and RFID outputs to a communal data base would remove these two problems.

The tag signal detection method proposed in this paper can be considered as systematic because the whole surface of interest is surveyed from equally spaced transects. We can nevertheless imagine another method utilizing two antennas, similar to that performed by May and Prior (2014), and allowing a faster and more efficient survey. The first antenna would remain fixed on its support (such as a trolley, backpack or harness) and maintained parallel to the surface of prospection during the entire survey period. Its role would be to record the tag signals in a known configuration, in order to facilitate the position estimations. The second mobile antenna would then be used as a seeker, by allowing a quick scan of the areas under investigation. Indeed, when the antenna is perpendicular to the surface of investigation, its detection range is larger than when it is parallel (about 20 m, even when tags are buried to a depth of around 1 m). Thus, the second antenna would provide information to guide the operator and avoid the systematic survey of large surface areas in which tags are absent. However, this second method has yet to be tested, especially the area covered by the second antenna sensing field, which is needed to calibrate the distance between survey passages.

Finally, we can also imagine a survey method using a drone. Indeed, the antenna detection range (decametric), and the reduced sizes and masses of readers and antennas, should allow them to be boarded on such a platform. This could permit large bar surfaces to be quickly surveyed, and allow smaller areas to be investigated more accurately than is possible by ground operators.

#### **ACKNOWLEDGEMENTS:**

This study was supported by a research grant from the French National Center of Scientific Research (CNRS) and Electricité de France (EDF). We especially thank Jean-René Malavoi who actively supported this research effort. We kindly thank Lorenzo Picco and anonymous reviewers for their constructive comments, Granulats Vicat society, notably Arnaud Jung, for the access to the gravel excavation, Tulio Grosso for his great help and dexterity to bury the tag equipped mast, Ludovic Bultingaire and Nicolas Chatard for their great technical support and Karl Embleton for his proofreading work.

# CHAPITRE 4 : TESTS PRATIQUES ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE POUR LA MESURE DE L'ÉMOUSSÉ DE PARTICULES SÉDIMENTAIRES FLUVIAL GROSSIÈRES PAR TRAITEMENT INFORMATIQUE D'IMAGE EN DEUX DIMENSIONS.

## Article numéro 3: Soumis

Cassel M, Piégay H, Lavé J, Vaudor L, Sri Hadmoko D, Budi Wibowo S, Lavigne F. “*Practical and experimental validations for measuring riverine pebble roundness using a 2D image-based computerized approach*”

### ABSTRACT

The geometrical characteristics of pebbles are important features to study transport pathways, sedimentary history, depositional environments, abrasion processes or to target sediment sources. Both shape and roundness of pebbles can be described by a still-growing number of metrics in 2D and 3D or by visual charts. Even though new developments have been made, existing tools are still proprietary and no pebble roundness toolbox is available online. The toolbox developed by Roussillon *et al.* (2009) automatically computes the size, shape and roundness indexes of pebbles from their 2D maximal projection plans. Because this toolbox operates using 2D pictures taken with any camera commercially available, of pebbles placed on a one-square-meter red board, data collection can be quickly and efficiently acquired at a large scale. In order to facilitate the use of the toolbox soon available online, we first assess the influence of pebble position and of the resolution and enhancement of pictures and clarify the sampling size question to address recommendations for future operators. Second, we run flume experimental tests of roundness trends that confirm the great potential of the Roussillon *et al.* (2009) toolbox for river geomorphic diagnoses as well as for targeting sediment sources. We also validated the correlation between roundness metric trends and particles abrasion, which was not yet done.

## 4.1 INTRODUCTION

The geometrical characteristics of pebbles have been subject to observation since Aristotle (Krynine, 1960). Such characteristics are an important physical property that enable the differentiation of transport pathways in glacial environments (Benn and Ballantyne, 1994; Lukas *et al.*, 2013), provide indications about sedimentary history, help to characterize



depositional environments (Graham and Midgley, 2000b), target sediment sources at catchment scales (Knighton, 1982; Lindsey *et al.*, 2007; Roussillon *et al.*, 2009; Miller *et al.*, 2014), highlight hydraulic controls on downstream fining or abrasion processes (Kuenen, 1956; Wentworth, 1919; Durian *et al.*, 2008; Domokos and Gibbons, 2013; Szabó *et al.*, 2013; Domokos *et al.*, 2014), influence in-river particle mobilization and displacement (Komar and Li, 1986; Ashworth and Ferguson, 1989; Kirchner *et al.*, 1990; Carling *et al.*, 1992; Schmidt and Ergenzinger, 1992; Schmidt and Gintz, 1995; Sear *et al.*, 2008; Stark *et al.*, 2014) and allow for the investigation of particle transport history on Mars (Szabó *et al.*, 2015).

Measurements the geometrical characteristics of pebbles have represented a challenge since the end of the 19th century and have led to long-standing debate (Blott and Pye, 2008). Barrett (1980) formalized a hierarchical classification of three independent pebble geometrical properties, which are defined as follows:

- Shape, with form frequently used as a synonym, refers to the ‘tri-dimensional characteristics’ of a particle and is independent of the particle size, being defined by metrics based on the ratios between particle length, breadth and thickness (the longest, intermediate and shortest orthogonal axes).
- Roundness and angularity, frequently considered as antonyms, refer to the relative sharpness of the corners and edges of a particle.
- Surface texture refers to the surface features that are small-scale relative to the size of the particle.

Therefore, both shape and roundness can be described by a still-growing number of metrics or by visual charts, while the surface texture remains poorly investigated, except for that of grains, perhaps because of the complex calculations needed to characterize it (Table 1, Tableau 23). The majority of the shape and roundness indexes and the silhouettes used in visual charts are defined using 2D projections obtained from photographs of pebbles. The development of new technologies and methods, such as image processing (Diepenbroek *et al.*, 1992; Bowman *et al.*, 2000; Drevin and Vincent, 2002; Drevin, 2007; Roussillon *et al.*, 2009; Montenegro Ríos *et al.*, 2013; Miller *et al.*, 2014; Takashimizu and Iiyoshi, 2016) and 3D laser scanning (Hayakawa and Oguchi, 2005; Lin and Miller, 2005; Zhao and Wang, 2016) has offered new methods to characterize pebble features and reduce operator bias (Bagheri *et al.*, 2015), allowing for the development of new calculation methods of existing metrics (Roussillon *et al.*, 2009) and new metrics (Sukumaran and Ashmawy, 2001; Drevin and

Vincent, 2002; Hayakawa and Oguchi, 2005; Lin and Miller, 2005; Bagheri *et al.*, 2015; Zhao and Wang, 2016).

**Table 1: Shape, roundness and surface texture parameters (adapted from Barrett, 1980)**

<b>Property:</b>	<b>Parameters or features</b>
<b>Shape/Form</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Elongation &amp; Flatness:</b> Wentworth (1922a), Zingg (1935), Dobkins &amp; Folk (1970), Illenberger (1991)</li> <li>- <b>Sphericity:</b> Cox (1927), Tickell (1931), Wadell (1932, 1933, 1935), Krumbein (1941), Pye and Pye (1943), Corey (1949), Aschenbrenner (1956), Folk (1955), Sneed and Folk (1958), Janoo (1998)</li> <li>- <b>Form ratio:</b> Corey (1949), Sneed and Folk (1958), Janke (1966), Illenberger (1991)</li> <li>- <b>Factor « F »:</b> Aschenbrenner (1956), Williams (1965)</li> <li>- <b>Equilibrium points:</b> Domokos <i>and al.</i> (2009), Szabo and Domokos (2010), Szabo <i>et al.</i> (2013)</li> </ul>
<b>Roundness</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Sharpest corner:</b> Wentworth (1919, 1922b), Riley (1941), Cailleux (1947), Kuenen (1956), Dobkins and Folk (1970)</li> <li>- <b>Average roundness of corners:</b> Wadell (1932), Roussillon <i>et al.</i>, (2009)</li> <li>- <b>Average angularity of corners:</b> Lees (1964a,b)</li> <li>- <b>Average roundness from convexity of outline:</b> Sukumaran and Ashmawy, (2001), Blott and Pye (2008), Roussillon <i>et al.</i>, (2009), Miller <i>et al.</i> (2014),</li> <li>- <b>Fourier transformation:</b> Schwarcz and Shane (1969), Ehrlich and Weinberg (1970), Diepenbroek <i>et al.</i> (1992)</li> <li>- <b>Morphological opening:</b> Drevin and Vincent (2002), Roussillon <i>et al.</i>, (2009)</li> <li>- <b>3D:</b> Hayakawa and Oguchi (2005), Lin and Miller (2005), Bagheri <i>et al.</i> (2015), Zhao and Wang (2016)</li> <li>- <b>Visual charts:</b> Russel and Taylor (1937), Krumbein (1941), Powers (1953), Pryor (1971), Crofts (1974)</li> </ul>
<b>Surface Texture</b>	Krinsley and Donahue (1968), Dowdeswell (1982), Beddow (1988), Bowman <i>et al.</i> (2000)

**Tableau 23. Synthèse des paramètres de forme, d'émoussé et de texture de surface (adapté de Barrett, 1980)**

Even though new developments have been made, existing tools are still proprietary and no pebble roundness toolbox is available online. The toolbox developed by Roussillon *et al.* (2009) automatically computes the size, shape and roundness indexes of pebbles from their 2D maximal projection plans (Table 2, Tableau 24). The toolbox could be made available online, but a few tests are still needed to provide practical guidance for its use and to validate its efficiency to investigate whether the different roundness indexes provide a good indication of the abrasion processes and additional information for river geomorphic diagnosis in terms of transport conditions and sediment delivery.

Should we expect pebble positions to affect the indexes? Should we expect any image resolution or enhancement bias based on the metrics used following Roussillon *et al.*'s (2009) statement? Moreover, even though the protocol is clear for calculating the metrics and is similar to the techniques that have already been explored for pebble size (e.g., Rice and

Church, 1996), the sampling size still requires consideration when designing field campaigns for collecting data. How many pebbles should we measure to achieve a good confidence level? To date and to our knowledge, Pissart *et al.* (1998) has been the only work to address the precision of the estimates of average roundness index according to sample size, but this work focused on only a single metric: the Cailleux index (Cailleux, 1947).

Moreover, many works in this field (Roussillon *et al.*, 2009; Miller *et al.*, 2014) interpret changes in roundness due to abrasion and longitudinal pattern discontinuity as sediment supply, but multiple interpretations exist. Most of the experimental studies on abrasion have focused on mass loss and not roundness changes ((Attal, 2003; Attal *et al.*, 2006; Attal and Lavé, 2009)). With the recent advances in RFID technology, it is now possible to measure the transport distance of particles in an annular flume (Cassel *et al.*, 2016). Combined with existing 2D roundness index automatic computer calculation, comparing roundness changes observed in the flume (real transport distance observed) with longitudinal trends observed in field conditions is now possible when considering similar distances. Confirming scientific strategies of space-for-time substitutions to provide a better understanding of sediment cascading complexes is also now viable. No one has previously shown the potential statistical laws linking roundness index changes with mass loss.

The objective of the study is to provide a few additional tests to enable the optimal use of Roussillon *et al.*'s (2009) toolbox now that it is available online at “[www.isig...](http://www.isig...)”. To do this, we first assessed the influence of pebble position and the resolution and enhancement of pictures of three pebble metrics computed by the toolbox associated with the b-axis for pebble samples with contrasting roundness. Second, we clarified the sampling size question by considering two samples of contrasting roundness. Finally, we investigated the indicative potential of our 2D metrics by comparing field measures in which we assumed roundness changes downstream were related to abrasion during transport and flume measures, for which we controlled transport distance. We measure abrasion during these runs.

**Table 2: Size, shape and roundness metrics computed using the Roussillon *et al.* (2009) toolbox.**

Index	Abbreviation and calculation formulas of the index
<b>Pebble size</b>	b-axis ( $L$ ), a-axis ( $l$ ), particle area ( $A_F$ ), particle perimeter ( $P_F$ )
<b>Elongation</b>	$e = \frac{l}{L}$ <p>Where: <math>l</math> is the a-axis length and <math>L</math> is the b-axis length.</p>
<b>Compacity</b>	$comp = \frac{P_F^2}{A_F}$ <p>Where: <math>P_F</math> is the particle perimeter and <math>A_F</math> is the particle area.</p>
<b>Circularity</b>	$circ = \frac{P_F}{2\sqrt{A_F\pi}}$ <p>Where: <math>P_F</math> is the particle perimeter and <math>A_F</math> is the particle area.</p>
<b>Convexity (perimeter ratio)</b>	$conv1 = \frac{P_{env.conv}}{P_F}$ <p>Where: <math>P_{env.conv}</math> is the convex hull perimeter and <math>P_F</math> is the particle perimeter.</p>
<b>Convexity (areas ratio)</b>	$conv2 = \frac{A_F}{A_{env.conv}}$ <p>Where: <math>A_{env.conv}</math> is the convex hull Area and <math>A_F</math> is the particle area.</p>
<b>Wadell</b>	$rW = \frac{1}{k.R} \sum_{i=1}^k r_i$ <p>Where: <math>R</math> is the radius of the largest inscribed circle and <math>r</math> is the radius of a circle smaller than <math>R</math>.</p>
<b>Cailleux</b>	$rC = \frac{r_{min}}{l}$ <p>Where: <math>r_{min}</math> is the radius of the smallest inscribed circle and <math>l</math> is the a-axis length.</p>
<b>Drevin</b>	$rD = \frac{A_{S \oplus C(0,r_c) \ominus C(0,r_c)}}{A_S}$ <p>Where: <math>A_{S \oplus C(0,r_c) \ominus C(0,r_c)}</math> is the particle area after the morphological opening with a circular structuring element <math>C</math> of center 0 and radius <math>r_c</math>. Operators <math>\oplus</math> and <math>\ominus</math> denote the Minkowski's addition (dilatation or thresholding of the distance transform of the complementary set of the silhouette) and Minkowski's subtraction (erosion or thresholding of the distance transform of the complementary set of the silhouette).</p>
$P_g/P_e$	$rP = \frac{P_g}{P_e}$ <p>Where: <math>P_g</math> is the perimeter of the particles and <math>P_e</math> is the perimeter of the best approximating ellipse.</p>

**Tableau 24. Indices de taille, forme et d'émoussé calculés par la toolbox de Roussillon *et al.* (2009)**

## 4.2 MATERIALS AND METHODS

### 4.2.1 Roussillon *et al.*'s (2009) toolbox

The software runs in two stages: (1) segmentation of the picture and (2) calculation of the shape and roundness metrics. The first stage of the image processing consists of segmenting the pebble projection plans on a contrasting color surface of known size (usually 1 m<sup>2</sup>). It then produces three intermediate results: (1) a binary raster image in which a pixel belongs either to a pebble or to the background surface, (2) a raster copy of the original images in which the pebble contours and identification numbers are provided and (3) a dataframe in a “.txt” format computing the raw parameters used in the second stage, which are used to calculate shape and roundness metrics for each pebble. Thus, segmentation is a crucial stage in obtaining the proper shape and roundness metrics results.

### 4.2.2 Particle metrics investigated

In this paper, three roundness indexes calculated by the Roussillon *et al.* (2009) toolbox were tested:

- $P_g/P_e$  (noted:  $rP$ ) is the ratio between the perimeter of the particle's silhouette ( $P_g$ ) and the best approximating ellipse ( $P_e$ ). The best approximating ellipse to a particle silhouette is defined using the same a-axis, b-axis and area as the silhouette. It is both a shape and a roundness index, which is relatively intuitive to understand. The wider the gap between both perimeters is, the more angular the particle is. This index is independent of size and elongation aspects.
- - The Wadell roundness index (noted:  $rW$ ) is the first roundness index (1932) based on the particle maximum projection plan that considers all corners. The index consists of a ratio between the mean radius of curvature of the corners smaller than the largest inscribed circle and the radius of the largest inscribed circle (Wadell, 1932). Despite the time-consuming measurements of all circles and radii when applied to a large number of particles, this index and its associated visual charts, as proposed by Krumbein (1941) to improve the efficiency of field measurements, have been the method most commonly used by later works (Blott and Pye, 2008). The Roussillon *et al.* (2009) toolbox was the first to provide an automatic calculation of this index, exhibiting correlation coefficients of 0.919 and 0.992 for the individual and mean values, respectively, of Krumbein's visual chart silhouettes. This index considers all the particle silhouette corners that are defined by a minimum of 8-connected pixels,

calculates their radius of curvature, and selects all radii smaller than the largest inscribed circle to apply the calculation formula proposed by Wadell (1932).







- Drevin (noted:  $rD$ ) is a roundness measure proposed by Drevin and Vincent (2002). This measure is the ratio between the area of the silhouette before and that after a morphological opening. “The morphological opening consists of an erosion followed by a dilation with a circular structuring element  $C$  of center  $O$  and radius  $r_c$ . This method presents the advantage of removing some shape features, like ‘capes’ or ‘isthmus’, without a contraction of the silhouette. The radius  $r_c$  of the circular structuring element was fixed to 75% of the radius  $R$  of the largest inscribed disk since it is the percentage for which  $rD$  had the best correlation with the values of Krumbein’s chart” (Roussillon *et al.*, 2009).

Table 3 () present images of the pebbles exhibiting minimal and maximal values of the three roundness metrics observed in the  $M_1$  and  $M_2$  samples (samples are described in the next section).

We also measured the  $b$ -axis in millimeters, which is the second-longest axis of the particle (e.g., the size) and perpendicular to the  $a$ -axis, the longest axis. This measurement will be used as a control of the pebbles fragmentation, which reduces pebbles sizes but, more importantly, also creates the new sharpest particle edges. Thus, this measurement can be used to sort pebbles and then, to put aside the products of breakups as well as the pebbles it affected and focus on pebble rounding caused by single abrasion phenomena.

These three metrics are selected because of their common use, their differing natures, and their supposed differences in sensitivity to picture resolution and enhancement. The Cailleux index (Cailleux, 1947), which can also be calculated by the toolbox, is not investigated in this study because, like other roundness metrics only considering the single sharpest edge, it was criticized for not representing the roundness of the whole particle (Blott and Pye, 2008). We aim to compare the effects of picture resolution and enhancement on the three roundness metrics listed by analyzing population distributions.

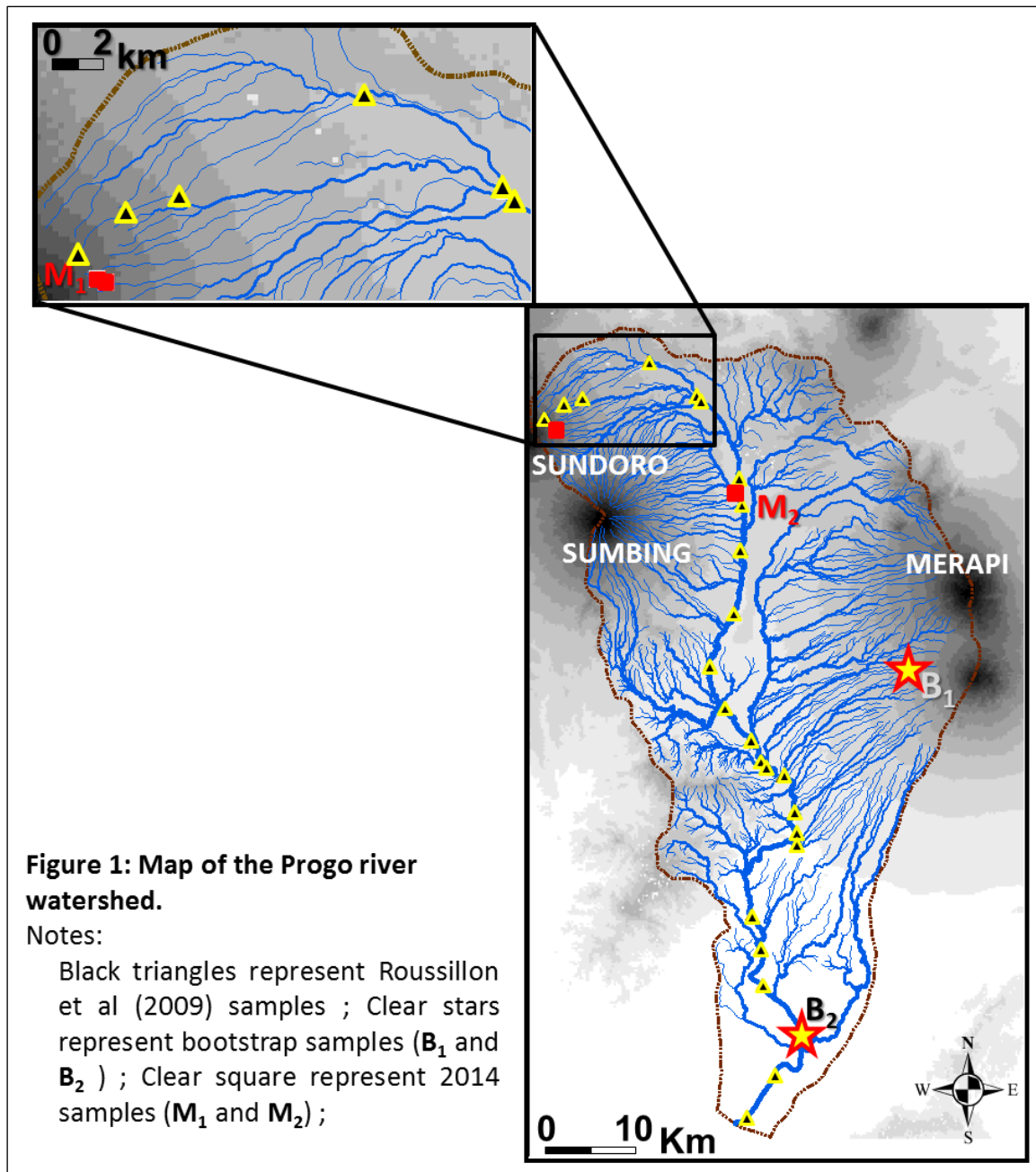
**Table 3: Values and images of pebbles presenting minimal and maximal values of the three shape and roundness metrics used in this study.**

Metrics	Min values	Max values
$rP$	 0.888	 0.993
$rD$	 0.628	 0.967
$rW$	 0.589	 0.935

**Tableau 25. Valeurs et images des galets présentant les valeurs minimales et maximale des indices de formes et d'émoussé étudiés.**

#### 4.2.3 Pebble samples

Two pebble samples were first randomly collected from river sites 30 km apart in the upper section of the Progo River (Central Java, Indonesia), which was studied by Roussillon *et al.* (2009) (Figure 1, 2 and 3). We collected samples with similar b-axis ranges but distinct roundnesses to explore abrasion processes in the flume and perform imagery tests:



**Figure 66. Carte du bassin versant de la rivière Progo sur l'île de Java.**

*Notes : les triangles indiquent les placettes imagées par Roussillon et al. (2009), les étoiles les sites des placettes des échantillons bootstrap  $B_1$  et  $B_2$  et les carrés les sites de collecte des échantillons  $M_1$  et  $M_2$ .*

- The first sample  $M_1$  is composed of 277 pebbles (25 kg) collected close to the Progo River spring ( $7^{\circ}16'10.6''$  S;  $110^{\circ}02'13.3''$  E), located on the eastern slope of the Sindoro Volcano (Figure 1, 2 and 3).
- The second sample  $M_2$  was composed of 182 pebbles (25 kg) collected in the Progo River bed approximately 30 km downstream the spring ( $7^{\circ}20'41.2''$  S;  $110^{\circ}12'33.0''$  E) (Figure 1, 2 and 3).



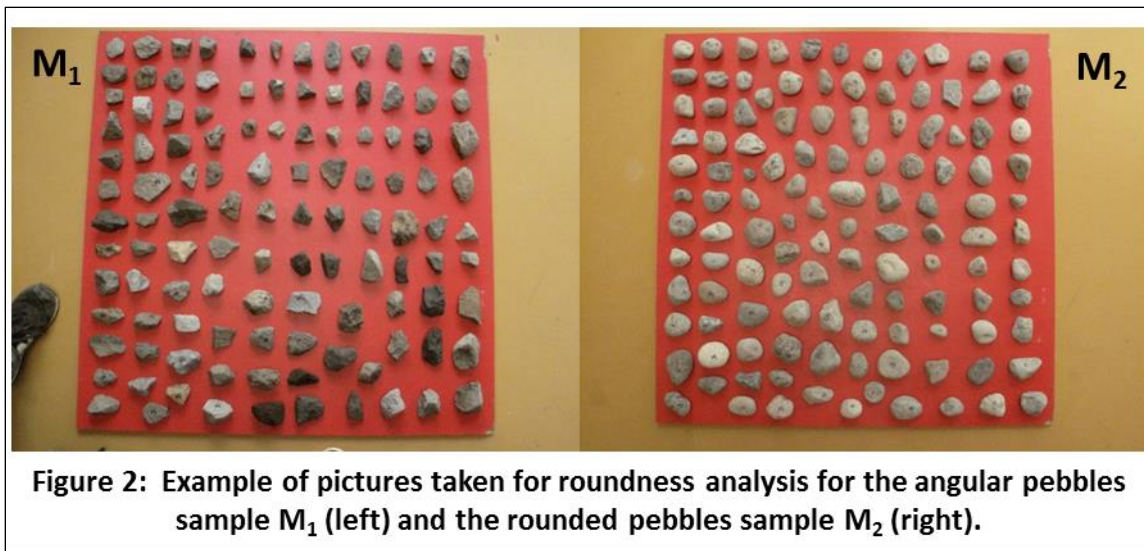
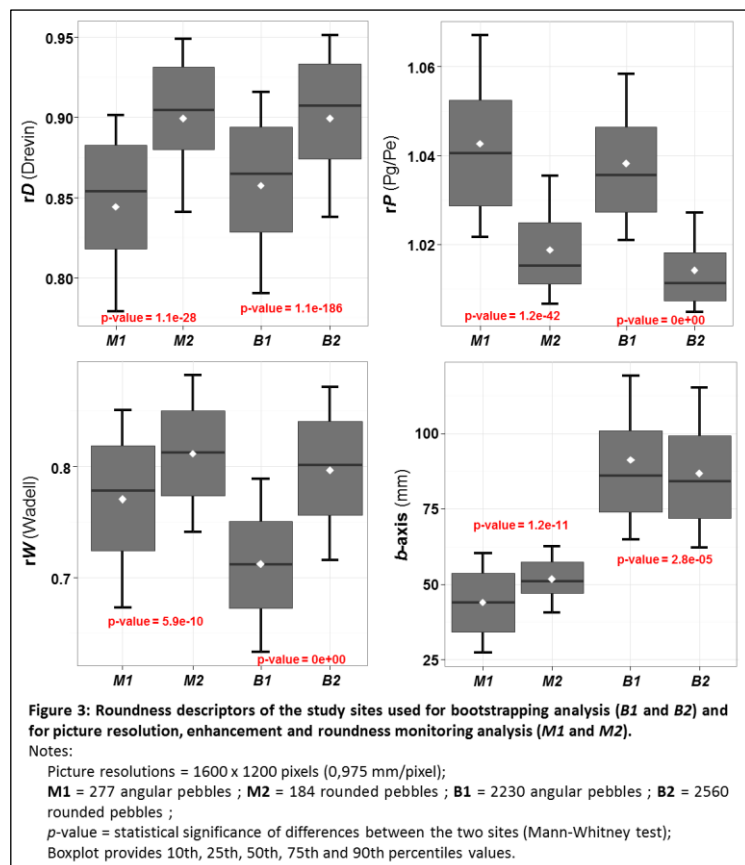


Figure 67. Exemple de photographies pour l'analyse de l'émoissé des échantillons anguleux  $M_1$  (à gauche) et émoissé  $M_2$  (à droite).

Figure 68. Distributions des 3 descripteurs de l'émoissé ( $rD$ ,  $rP$ , et  $rW$ ) et de l'axe  $b$  des échantillons de particules utilisés pour les analyses ( $B_1$ ,  $B_2$ ,  $M_1$  et  $M_2$ ).

Notes : les échantillons  $B_1$  et  $B_2$  sont utilisés pour l'analyse par bootstrapping ; les échantillons  $M_1$  et  $M_2$  sont utilisés pour l'analyse des effets de la position des galets et des résolutions et corrections des photographies ainsi que du suivis de l'évolution de l'émoissé.



Two additional large samples  $B_1$  and  $B_2$  collected by Roussillon *et al.* (2009) were used to analyze the effects of sample size on roundness metric summary statistics (e.g., median or specific percentiles). Pebbles were randomly selected and then deposited on a one-meter

square red board, where they were photographed with a digital camera with a 1600 x 1200 pixel resolution.

- The first sample was composed of 38 pictures, or a total of 2230 (angular) pebbles sampled in the Senowo (a left bank tributary of Progo River) lahar corridor located on the Northeast hillslope of the Merapi Volcano ( $7^{\circ}32'05.8''$  S;  $110^{\circ}23'56.1''$  E). This sample will be called  $B_1$  for the rest of this paper (Figure 1 and 2).
- The second sample was composed of 40 pictures or a total of 2560 (rounded) pebbles randomly sampled in the Progo riverbed, approximately 15 km upstream of the river mouth ( $7^{\circ}53'40.3''$  S;  $110^{\circ}16'27.9''$  E). This sample will be called  $B_2$  for the rest of this paper (Figure 1 and 2).

#### 4.2.4 Tests for practical applications.

##### 4.2.4.1 Effect of pebbles' positioning on roundness index measurement.

Little attention has been paid to the effect of the pebble positioning on the segmentation of the maximum projection plan. Indeed, while a-axis and b-axis identification is relatively easy, even for novice investigators, the choice between the two faces on which pebbles can be set remains uninvestigated and is considered a potential practical limitation not experienced with 3D approaches. Thus, it is necessary to determine the influence of the pebble face exposed to the camera on roundness metrics results to increase user confidence. To this end, we deposited the pebbles of the samples  $M_1$  and  $M_2$  on a one-meter square red board to expose their maximal projection plan to the camera (position:  $f_a$ ). We took pictures (1 picture for each sample) at a resolution of 4416 x 3312 pixels with a digital camera. Then, we turned the pebbles on their opposite side and took a second set of pictures (position:  $f_b$ ). The picture resolutions were then reduced by downsampling to the same resolution used by Roussillon *et al.* (2009): 1600 x 1200 pixels. We analyzed the distributions of the roundness metrics ( $rD$ ,  $rP$  and  $rW$ ) of both  $M_1$  and  $M_2$  according to the side exposed to the camera and performed Mann-Whitney tests to assess the significance of the observed differences.

##### 4.2.4.2 Effects of picture resolution and enhancement effects on roundness index measurement

We used the pictures taken with the  $M_1$  and  $M_2$  samples in position  $f_a$  to produce three copies of each original picture with a resolution of 4416 x 3312 pixels:

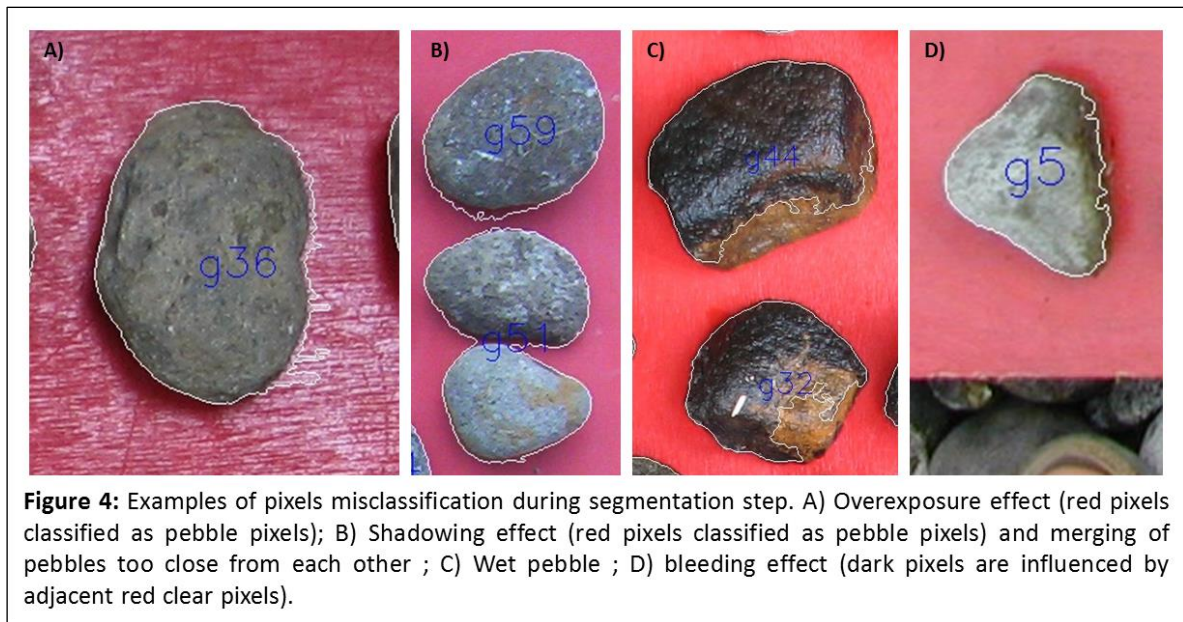
- The first copy of the picture was processed without any previous picture enhancement, during or after algorithm calculations. This picture enhancement (or, here, absence of enhancement) will hereafter be referred to as “ $UN$ ” for “uncorrected”.

- The second picture was a copy of the UN image but was improved before being processed. The picture improvement was carried out by making close observations of the resulting image computed by the algorithm to identify segmentation errors and correct the original picture. Corrections consisted mainly of improving colors of misclassified pixels. These manual corrections processed with digital painting software are relatively time consuming, taking between 10 and 20 seconds per pebble depending on the precautions taken while photographing the pebbles. This picture enhancement will be referred to as “**MC**” (for “manual correction”) hereafter. We considered the results provided by this method as a reference in that they represented the most accurate results.
- The third picture copy was color-filtered to intensify the red channel of the pixels to reduce brightening and maximize the contrast between the pebbles and the red board before being processed. This picture enhancement was realized by batch processing with the Gimp software. Thus, this picture enhancement method was much faster than the manual correction treatment and was expected to reduce the segmentation errors. This picture enhancement will hereafter be referred to as “**FIL**” (for “filtering”).

These three picture sets were then duplicated to create four subsets of the same pictures with different resolutions: 4416 x 3312, 2208 x 1656, 1600 x 1200 (i.e., that of Roussillon *et al.* (2009)) and 1104 x 828 pixels, which correspond to mean pixel sizes of 0.355, 0.705, 0.975 and 1.41 mm, respectively. The reduction in the resolution, achieved by downsampling, was also realized by batch processing with Gimp software.

Thus, for each picture of the samples  $M_1$  and  $M_2$ , we created a total of 12 copies of the same picture corresponding, to the three picture enhancements (that is **MC**, **UN** and **FIL**) and four picture resolutions (namely, 0.355, 0.705, 0.975 and 1.41 mm/pixel, listed from highest to the lowest ones).

From the three roundness metrics ( $rD$ ,  $rP$  and  $rW$ ) and the  $b$ -axis we selected, the  $rP$  index is supposedly sensitive to both the picture resolution and enhancement. The  $rW$  index is also supposedly very sensitive to both the picture resolution and enhancement because segmentation errors (Figure 4, Figure 69) might produce forms wrongly identified to be corners. Conversely, because of its calculation procedure, the  $rD$  index is supposed to be quite insensitive to either the picture resolution or enhancement. Similarly, the  $b$ -axis is supposedly quite insensitive to the picture resolution and picture enhancement.



**Figure 69. Exemples de mauvaises classifications des pixels pendant l'étape de segmentation des images.**

*Notes (A) effet de surexposition ; (B) Effet d'ombrage et fusion de particules ; (C) particules à la surface humide (D) « saignement » de pixel.*

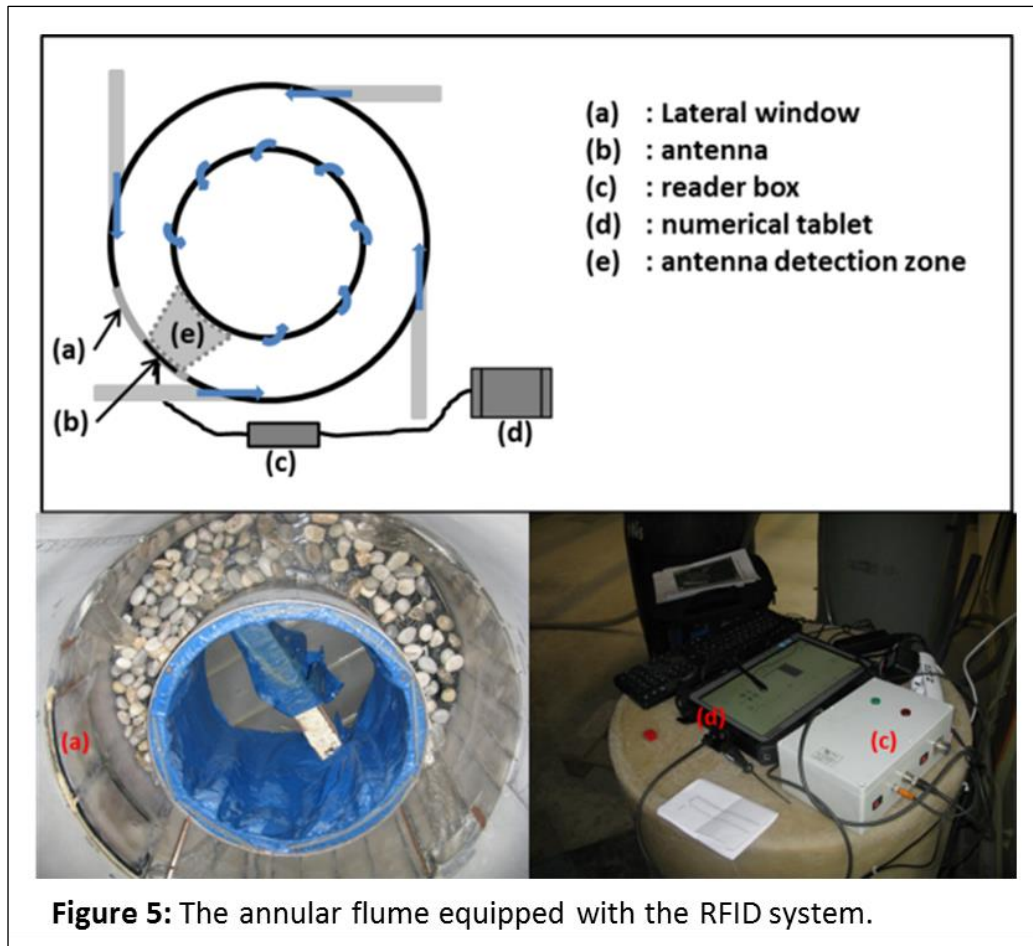
#### 4.2.4.3 Effect of sample size on roundness index measurement.

We used the pebble samples  $B_1$  and  $B_2$  in a bootstrapping process. The bootstrapping process we designed consisted of creating 1000 bootstrap subsamples with sample sizes ranging from 50 to 2300 pebbles and from 50 to 2500 pebbles for samples  $B_1$  and  $B_2$ , respectively. We estimated the  $D_{16}$ ,  $D_{50}$  and  $D_{84}$  percentiles of the three roundness metrics and b-axis for each of the investigated bootstrap subsamples and then calculated their standard errors.

#### 4.2.5 Experimental tests to assess relevance of 2D images-based approach to assess roundness

To assess the relevance of using the method described by Roussillon *et al* (2009) to apply the 2D pebbles roundness index to infer the abrasion effects from transport via space-for-time substitution strategy, we carried out an experiment using an annular flume. We equipped the flume with a passive low frequency radio frequency identification (LF-RFID) system to measure the mean velocities and transport distances of four tagged pebbles (Cassel *et al.*, 2016). This system is composed of a specially designed antenna and a reader box connected to a numerical tablet (Figure 5, Figure 70), which is used to estimate the mean distances traveled by the pebbles. In this flume, only the interactions between pebbles produce abrasive contacts (Attal and Lavé, 2006). Using the  $M_1$  angular pebble sample, we proceeded to 8 abrasion runs (see Table 4 for run discharges, durations and estimations of the distances

traveled by pebbles). The discharges and durations of abrasion runs were established based on previous observations made by Attal *et al.*, (2006), Attal and Lavé, (2009) et Cassel *et al.*, (2016) with the objective of making the pebbles travel under river bedload conditions (*i.e.*, pebbles alternating motion and rest periods) in a specific time (R1 to R6 in Table 4) to reach a distance approximately 26 km (R7 and R8 in Table 4, Tableau 26).



**Figure 70. Le canal annulaire d'Attal (2003) équipé du système RFID passive basse fréquence PIT Tag.**

**Table 4: Characteristics of the 8 abrasion experiment runs.**

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
<b>Duration (min)</b>	89	40	40	40	96	120	41	90
<b>Flow fixed at the pump (m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>)</b>	240	240	240	240	240	240	350	350
<b>Mean pebble velocity (m.s<sup>-1</sup>)</b>	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	1.9	1.9
<b>Cumulative mean distance traveled, <i>d</i> (m)</b>	2435	3533	4634	5722	8361	11655	16295	26555
<b>Mean abrasion rates, <i>k</i> (in %.km<sup>-1</sup>)</b>	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.5	1.5

**Tableau 26. Caractéristiques des 8 expérimentations d'abrasion.**

These abrasion runs were interrupted by the sieving, weighing and photographing of pebbles on a one-square meter red board to calculate roundness metrics ( $rP$ ,  $rW$ ,  $rD$ ). To prevent any disturbance induced by pebble breakage (a single pebble that breaks produces smaller angular pebbles), the roundness evolution was established using only particles with a b-axis greater than 40 mm. Then, we compared the three roundness metrics and b-axis evolutions according to the distance traveled. This trend, without disturbance such as sediment supplied by hillslopes or tributaries, was then compared to the  $M_2$  rounded pebble sample and to the trends in roundness obtained by reanalyzing the pictures taken by Roussillon *et al.* (2009) along the Progo River channel over the same distance. In the example shown by Roussillon *et al.* (2009) for the Progo River, the roundness metrics exhibited homogeneous trends that were stopped by breaks near kilometer 20. The authors interpreted the trends in particle roundness metrics as being linked to transport and associated abrasion, arguing that the abrasion of particle corners mainly occurs during the first kilometers of travel and that the breaks in the roundness metric trends could be attributed to the supply of fresh angular sediments from a tributary coming from the northern hillsides of the Sumbing Volcano. For this experiment, we pass over the range of Roussillon *et al.*, (2009) observing the breaks in the in-field trends to explore the specific input context with flume. The picture resolution used for the automatic computation of the three roundness metrics and b-axis metrics is 1600 x 1200 pixels, *i.e.*, the same as that used by Roussillon *et al* (2009), to avoid potential effects of picture resolution when comparing the experiment results with the previous field measures.

Finally, from the mass measurements, we calculated the mass loss of the  $M_1$  angular pebble sample during 8 abrasion runs and divided them to the estimates of distance traveled. In this way, we established the mean abrasion rates and noted  $k$  (the percent of mass lost by kilometer traveled; see Table 4) for the two discharges investigated since Attal and Lavé (2009) have shown that the abrasion rates are dependent on the transport stage and, thus, the discharge. Then, we used the abrasion rates and distances traveled at each discharge point to establish, following equation  $EI$ , the cumulative abrasion (noted as  $\sum A$ , in percentage of initial mass lost) observed all along the abrasion experiment runs. Then, we compared the evolution of the cumulative abrasion to the trends of the  $rD$ ,  $rP$  and  $rW$  mean values to investigate the relation between the abrasion and rounding trends.

$$\Sigma A \text{ (in \%)} = \sum_{i=1}^{R1 \rightarrow R8} k_i * d_i \quad (\text{E1})$$

Where:

$k_i$  is the abrasion rate (in  $\% \cdot \text{km}^{-1}$ ) at a given discharge  $i$

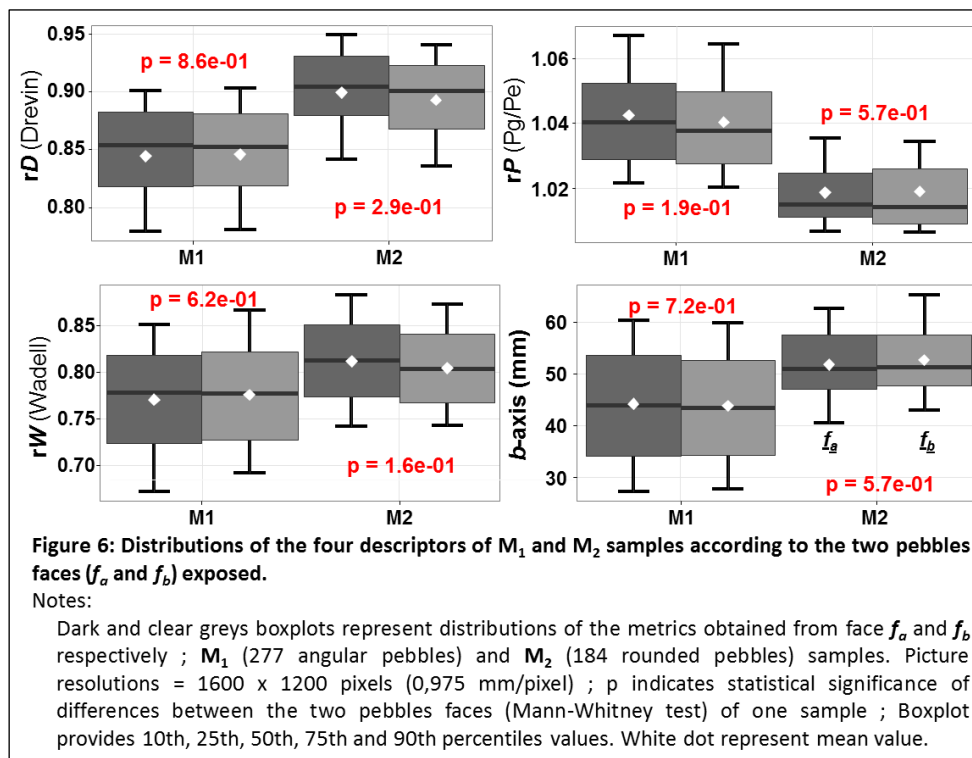
$d_i$  is the distance traveled (in km) at the same given discharge

## 4.3 RESULTS

### 4.3.1 Practical tests

#### 4.3.1.1 Effects of pebble position on roundness metrics.

The distributions of the three roundness metrics and the b-axis are first shown according to the pebble side for the two samples  $M_1$  and  $M_2$  (Figure 6, Figure 71). The choice of the measured pebble face does not significantly influence the metrics distributions of either sample  $M_1$  or sample  $M_2$ . However,  $rD$  and  $rW$  seem to be slightly more influenced by the pebble side in sample  $M_2$  than in sample  $M_1$ . Conversely,  $rP$  seems slightly more sensitive to the pebble side for sample  $M_1$  than sample  $M_2$ , but neither sensitivity is statistically significant.



**Figure 71. Distributions des 3 descripteurs de l'émoussé ( $rD$ ,  $rP$ , et  $rW$ ) et de l'axe b des échantillons  $M_1$  (anguleux) et  $M_2$  (émoussé) en fonction de la face exposée.**

This result confirms that the operator should be confident when positioning the pebble on the red board and should not be concerned about which is the best position.

#### *4.3.1.2 Effects of picture resolutions and enhancements on roundness metrics.*

The distributions of the three roundness metrics and  $b$ -axis for the  $M_1$  and  $M_2$  samples show different sensitivities to the picture resolution and enhancement (Figure 7, Figure 72). While  $rP$  and  $rW$  are very sensitive roundness metrics, the  $b$ -axis and  $rD$  metrics are only slightly sensitive.

##### ***rD and b-axis***

The  $rD$  and  $b$ -axis are slightly sensitive to picture resolution and slightly more sensitive to the picture enhancement.

The  $rD$  values of both the  $M_1$  and  $M_2$  samples are slightly sensitive to the picture enhancements at the highest resolution (0.355 mm/pixel), and the values of both samples decrease from **MC** to **UN** and from **UN** to **FIL**. At the 0.705 mm/pixel resolution, the rounded pebble (sample  $M_1$ ) distributions are still sensitive to picture enhancement, and their values decrease, while the angular pebbles (sample  $M_2$ ) are not sensitive to picture enhancement. At the 0.975 and 1.41 mm/pixel resolutions, these relationships reverse: rounded pebble distributions are insensitive to picture enhancements, while angular pebble distributions are, and their values increase.

The  $b$ -axis values of sample  $M_2$  (angular pebbles) are sensitive to picture enhancement at the two highest resolutions (0.355 and 0.705 mm/pixel). Notably, at these resolutions, the **FIL** picture enhancement exhibits values very different from those of the two other enhancements. The effects of picture enhancement are insignificant for the two lowest resolutions (0.975 and 1.41 mm/pixel). The  $b$ -axis of sample  $M_1$  (rounded pebbles) is less sensitive than the  $b$ -axis of sample  $M_2$ . Indeed, the distributions of sample  $M_1$  are very similar for all the picture resolutions and treatments except for the uncorrected picture (**UN**) at the 0.975 mm/pixel resolution.

##### ***rP and rW***

The  $rP$  and  $rW$  roundness metrics are sensitive to both the picture resolution and picture enhancement. The sensitivity of these two metrics to picture enhancement is particularly obvious at the highest resolution (0.355 mm/pixel) for both the  $M_1$  and  $M_2$  samples. Indeed, at this resolution (0.355 mm/pixel), their distributions considerably based on

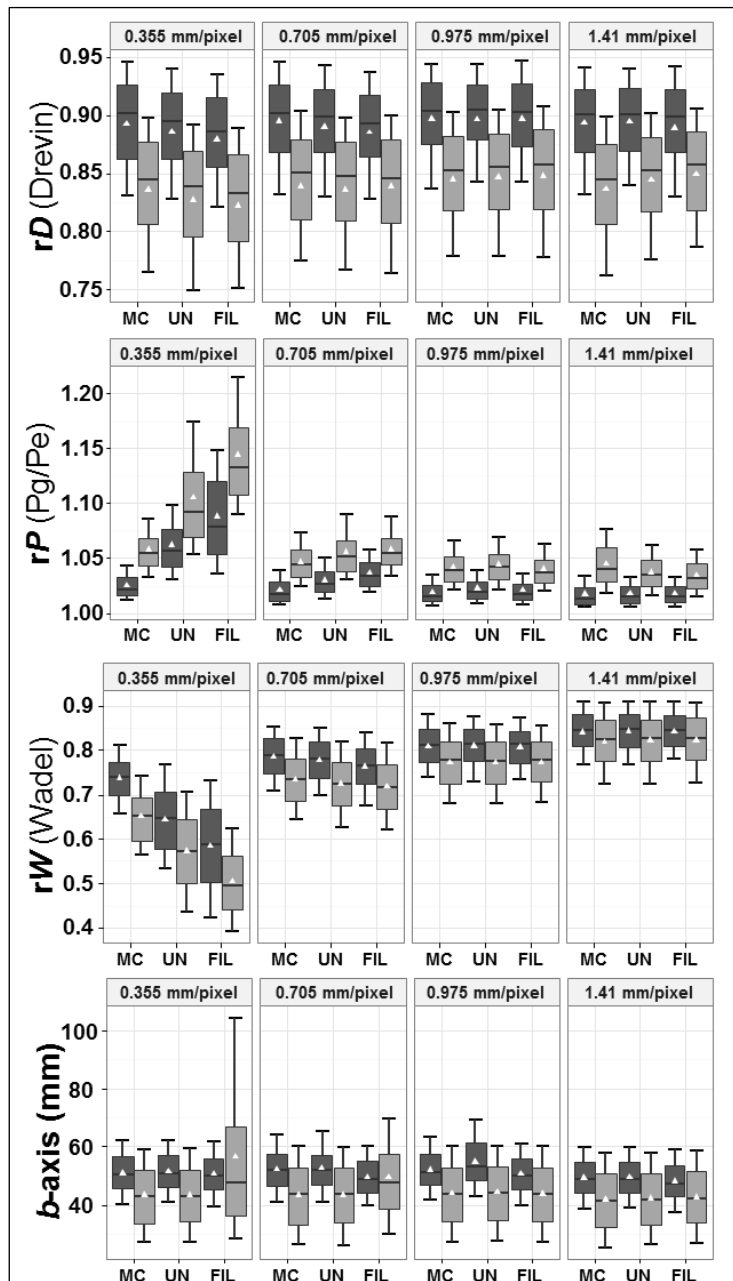


the picture enhancement. The differences are especially pronounced between the **MC** and **UN** enhancements and between the **MC** and **FIL** picture enhancements. The values of  $rP$  obtained with the **MC** enhancement are lower than those obtained with the **UN** enhancement. In addition, the latter results in results are also lower than those obtained with the **FIL** enhancement. The inverse effect (**MC** enhancement producing higher values) is observed for  $rW$ . At this resolution, the gap observed between the  $M_1$  and  $M_2$  sample distributions for these two roundness metrics when applying the **MC** treatment decreased with the **UN** and **FIL** picture enhancements.

When the picture resolution decreases, the effects of picture enhancement also decrease.

At the 0.705 mm/pixel resolution, an effect of picture enhancement is still visible for both the  $M_1$  and  $M_2$  sample distributions, even when it is considerably reduced compared to those of the highest resolution. Particularly, the differentiation between the  $M_1$  and  $M_2$  sample distributions is influenced since the gap is slightly reduced for the **UN** and **FIL** enhancements compared to that of the **MC** enhancement. From the **MC** to **UN** and from the **UN** to **FIL** enhancements, values continue growing and shrinking, but to a lesser extent than with the previous picture resolution, for  $rP$  and  $rW$ , respectively. Thus, regardless of the picture enhancement, all the  $rP$  values decrease as the picture resolution decreases, while conversely, the  $rW$  index values increase.

**Figure 72. Distributions des 3 descripteurs de l'émoissé ( $rD$ ,  $rP$ , et  $rW$ ) et de l'axe  $b$  des échantillons  $M_1$  (anguleux) et  $M_2$  (émoissé) en fonction de la et du traitement des photographies.**



**Figure 7: Distributions of the roundness descriptors of the  $M_1$  and  $M_2$  samples according the four picture resolutions and the three picture enhancements.**

Notes:

Clear greys and dark boxplots represent distributions of  $M_1$  (277 angular pebbles) and  $M_2$  (184 rounded pebbles) samples respectively.

Picture resolutions: 0.355 mm/pixel (4416 x 3312 pixels), 0.705 mm/pixel (2208 x 1656 pixels), 0.975 mm/pixel (1600 x 1200 pixels), 1.41 mm/pixel (1104 x 828 pixels); Picture enhancements: **MC** = manually corrected ; **UN** = uncorrected ; **FIL** = colored filtering; Boxplot provides 10th, 25th, 50th, 75th and 90th percentiles values. White triangles represent mean value

At the 0.975 mm/pixel resolution, the effects of picture enhancement are again reduced compared to those of the previous resolutions and are nearly insignificant. A tenuous effect is observable in the  $rP$  values, which increase from the **MC** to **UN** enhancements before decreasing from **UN** to **FIL**. However, the gap between the  $M_1$  and  $M_2$  sample distributions slightly decreases from the **MC** to **UN** enhancements as well as from the **UN** to **FIL** enhancements. The  $rW$  index is insensitive to the picture enhancement at this resolution. The reduced gap, compared to that of the previous resolution, between the  $M_1$  and  $M_2$  sample distributions is stable for all picture enhancements. Again, regardless of the picture treatment, all the  $rP$  values decrease as the picture resolution decreases, while conversely, the  $rW$  index values increase. However, this difference is less pronounced between the 0.705 mm/pixel and 0.975 mm/pixel resolutions than between the 0.355 and 0.705 mm/pixel resolutions.

At the 1.41 mm/pixel resolution, the effect of the picture enhancement increases slightly for the  $rP$  index and is insignificant for the  $rW$  index. Indeed, the differences in the distributions of the  $rP$  values according to the picture enhancement are more pronounced than those of the 0.975 mm/pixel resolution. The gap between the  $M_1$  and  $M_2$  sample distributions of the  $rP$  values reduces from the **MC** to **UN** and from the **UN** to **FIL** picture enhancements in a similar manner as that at the 0.975 mm/pixel resolution. At the 1.41 mm/pixel resolution, the gap between the  $M_1$  and  $M_2$  sample distributions of the  $rW$  index is again reduced compared to the previous resolutions and is now insignificant. Again, regardless of the picture treatment, all the  $rW$  index values increase as the picture resolution decreases.

$rW$  is very sensitive to both the picture resolution and type of picture enhancement:

- The  $rW$  values increase when the picture resolutions decrease. Angular pebble values increase more strongly than the rounded pebble values, leading to an important diminution of the gap between the two pebble samples.
- The  $rW$  values are highly sensitive to picture enhancement at higher resolutions. Indeed, the effects of picture enhancement decrease with resolution.

$rP$  is also sensitive to both the picture resolutions and picture enhancements:

- The  $rP$  values decrease as picture resolution decreases for both the angular and rounded pebble values in a similar manner.
- The  $rP$  values are highly sensitive to picture enhancement at higher resolutions. The effect of picture enhancement decreases with the resolution. Conversely, for the  $rW$  index, **MC** enhancement allows the preservation of the differentiation between the  $M_1$  and  $M_2$  sample distributions at all the picture resolutions investigated.

These results highlight the facts that:

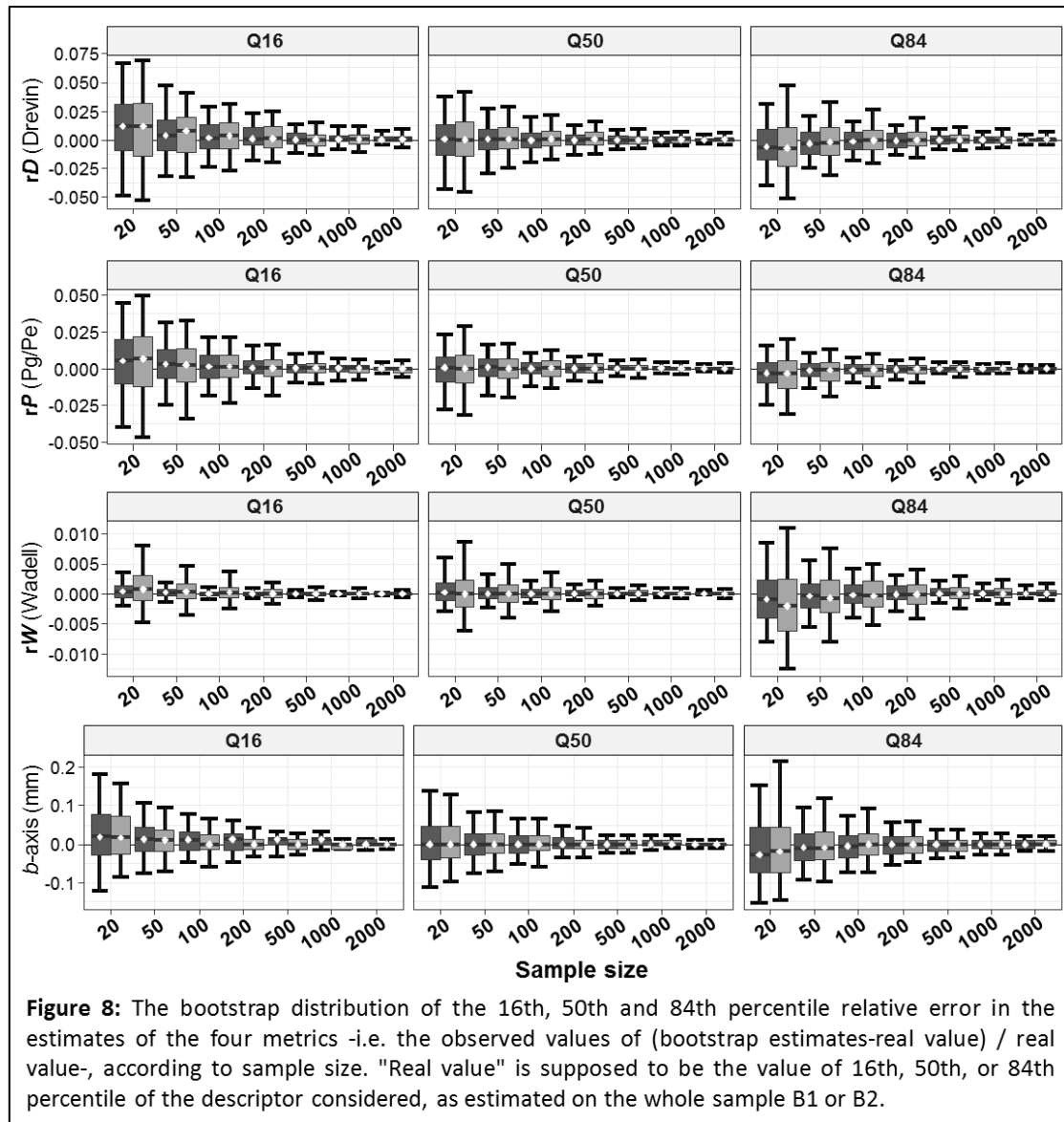
- it is crucial to use pictures of the same resolutions when undertaking comparative analyses of roundnesses, particularly when using  $rW$  or  $rP$ .
- for the grain size investigated in this study, a picture dimension of 1600 x 1200 pixels (0.975 mm/pixel) avoids the need for picture enhancements. For efficiency, there is a need to be very careful during field data acquisitions to avoid any artificial improvement (see final recommendations) and to develop the visual controls of the photos based on the first set of acquisitions once the software is applied to visualize the detection problems (see Figure 4, Figure 69).

#### 4.3.1.3 Effects of sample size on roundness metrics.

The bootstrap distribution of the estimated percentiles on the orders of 16%, 50% and 84% of the three roundness metrics and the b-axis are calculated for varying sample sizes. The relative errors in these estimates (*i.e.*, (bootstrap estimate-real value) / real value) are displayed according to the sample size (Figure 8, Figure 73). The "real value" is supposed to be the value of the 16th, 50th, or 84th percentiles of the metrics considered, as estimated for the whole samples of  $B_1$  or  $B_2$ .

In our case, the real value of the  $b$ -axis in  $B_2$  is 97.7% of the real value of the  $b$ -axis in  $B_1$ , while this ratio is 112.5, 104.9, and 97.7 for  $rD$ ,  $rW$  and  $rP$ , respectively.

As for  $rD$ , in 95% of the cases, the relative errors in the estimates of  $Q_{50}$  are  $\leq \pm 4.54\%$ . Hence, to be able to observe a significant difference between the two populations in the  $Q_{50}$  of  $rD$  with sample sizes as small as  $n=20$ , the relative changes between the two populations should be no less than  $\approx \pm 10\%$  (for instance, the populations  $B_1$  vs  $B_2$  have a difference of 12.5%). For sample sizes  $\geq 100$ , the relative errors are, in 95% of the cases,  $\leq \pm 2.12\%$ . Hence, with sample sizes  $\geq 100$ , it should be possible to observe a difference as soon as the relative changes between the two populations are greater than  $\approx \pm 4\%$ . The relative errors in  $Q_{16}$  and  $Q_{84}$  are, in 95% of the cases,  $\leq \pm 6.92$  and  $\leq \pm 5.09\%$ , respectively ( $\leq \pm 3.06$  and  $\leq \pm 2.59\%$  for sample sizes  $\geq 100$ ). The relative errors tend to be slightly less important (across all sizes and the 3 percentiles  $Q_{16}$ ,  $Q_{50}$  and  $Q_{84}$ ) for  $B_2$  than for  $B_1$  (mean ratio of the interquartile ranges for  $B_2$  compared to  $B_1 = 0.9$ ). The estimates of  $Q_{16}$  and  $Q_{84}$  of  $rD$  are slightly biased, with relative errors of up to 0.99% and -0.48%, respectively. These decrease to 0.32% and -0.11%, respectively, with sample sizes  $\geq 100$ .



**Figure 73. Distributions des erreurs relatives des 16th, 50th et 84th percentiles obtenues en fonction des tailles d'échantillon bootstrap.**

As for  $rW$ , in 95% of cases, the relative error in the estimate of  $Q_{50}$  is  $\leq \pm 3.18\%$ . To be able to observe a significant difference between the two populations in the  $Q_{50}$  of  $rW$  for sample sizes as small as  $n = 20$ , the relative changes between the two populations should be greater than  $\approx \pm 6\%$  (This is not the case, for instance, for the populations B1 vs B2 with their difference of 4.9%). For sample sizes  $\geq 100$ , the relative errors are, in 95% of the cases,  $\leq \pm 1.38\%$ . Hence, with sample sizes  $\geq 100$ , it should be possible to observe the difference as soon as the relative change between the two populations is  $\approx \pm 3\%$ . The relative errors in  $Q_{16}$  and  $Q_{84}$  are, in 95% of the cases,  $\leq \pm 4.88\%$  and  $\leq \pm 3.1\%$ , respectively ( $\leq \pm 2.29\%$  and  $\leq \pm 1.32\%$  for sample sizes  $\geq 100$ ). The relative errors tend to be slightly less important (across all sizes and the 3 percentiles  $Q_{16}$ ,  $Q_{50}$  and  $Q_{84}$ ) for  $B_2$  than for  $B_1$  (mean ratio of the interquartile

ranges of  $B_2$  compared to  $B_I = 0.9$ ). The estimates of  $Q_{16}$  and  $Q_{84}$  of  $rW$  are slightly biased, with a relative error of up to 0.47% and -0.44%, respectively. These decrease to 0.12% and -0.11%, respectively, for sample sizes  $\geq 100$ .

As for  $rP$ , in 95% of cases, the relative error in the estimate of  $Q_{50}$  is  $\leq \pm 0.86\%$ . Hence, to be able to observe a significant difference between the two populations in the  $Q_{50}$  of  $rP$  for sample sizes as small as  $n = 20$ , the relative change between the two populations should be greater than  $\pm 1.7\%$  (which is the case, for instance, for the populations  $B_1$  vs  $B_2$  with their relative difference of -2.3%). For sample sizes  $\geq 100$ , the relative error is, in 95% of the cases,  $\leq \pm 0.35\%$ . With sample sizes  $\geq 100$ , it should be possible to observe a difference as soon as the relative change between the two populations is greater than  $\approx \pm 0.7\%$ . The relative errors in  $Q_{16}$  and  $Q_{84}$  are, in 95% of the cases,  $\leq \pm 0.81$  and  $\leq \pm 1.24\%$ , respectively ( $\leq \pm 0.36$  and  $\leq \pm 0.53\%$  for sample sizes  $\geq 100$ ). The relative error tends to be less important (across all sizes and the 3 percentiles  $Q_{16}$ ,  $Q_{50}$  and  $Q_{84}$ ) for  $B_2$  than for  $B_I$  (mean ratio of the interquartile ranges for  $B_2$  compared to  $B_I = 0.6$ ). The estimates of  $Q_{16}$  and  $Q_{84}$  of the  $rP$  are slightly biased, with relative errors of up to 0.1% and -0.16%, respectively. These decrease to 0.03% and -0.01%, respectively, for sample sizes  $\geq 100$ .

Overall, when using the metrics  $rP$  and  $rD$ , a sample size of 100 particles seems to be sufficient to be able to assess the differences in the roundnesses in the ranges of the effect sizes encountered (either between the highly contrasting  $B_1$  and  $B_2$  sample sets or between successive states with lower contrasts, such as those exhibited by  $M_1$  in the flume experiment). When using  $rW$ , on the other hand, the errors in the estimates for a sample size of 100 particles are such that they make differences difficult to observe. For such effect sizes and for the metrics  $rP$  and  $rD$ , increasing the sample size to  $\geq 200$  particles offers a minimal gain in estimation accuracy.

#### **4.3.2 Flume experimental test of 2D roundness metrics to highlight abrasion patterns**

A simple visual comparison of the angular pebble samples before (Figure 9-A, Figure 74-A) and after (Figure 9-B, Figure 74-B) the abrasion experiment shows, as expected, a trend in the rounding of pebbles during the 8 abrasion runs. This rounding is better described by the  $rP$  and  $rD$  roundness metrics (Figure 10-A1, A2; Figure 75-A1, A2), whose trends decrease and increase, respectively, than by the  $rW$  metric (Figure 10-A3, Figure 75-A3), whose tiny increasing trend is impacted by several fluctuations.



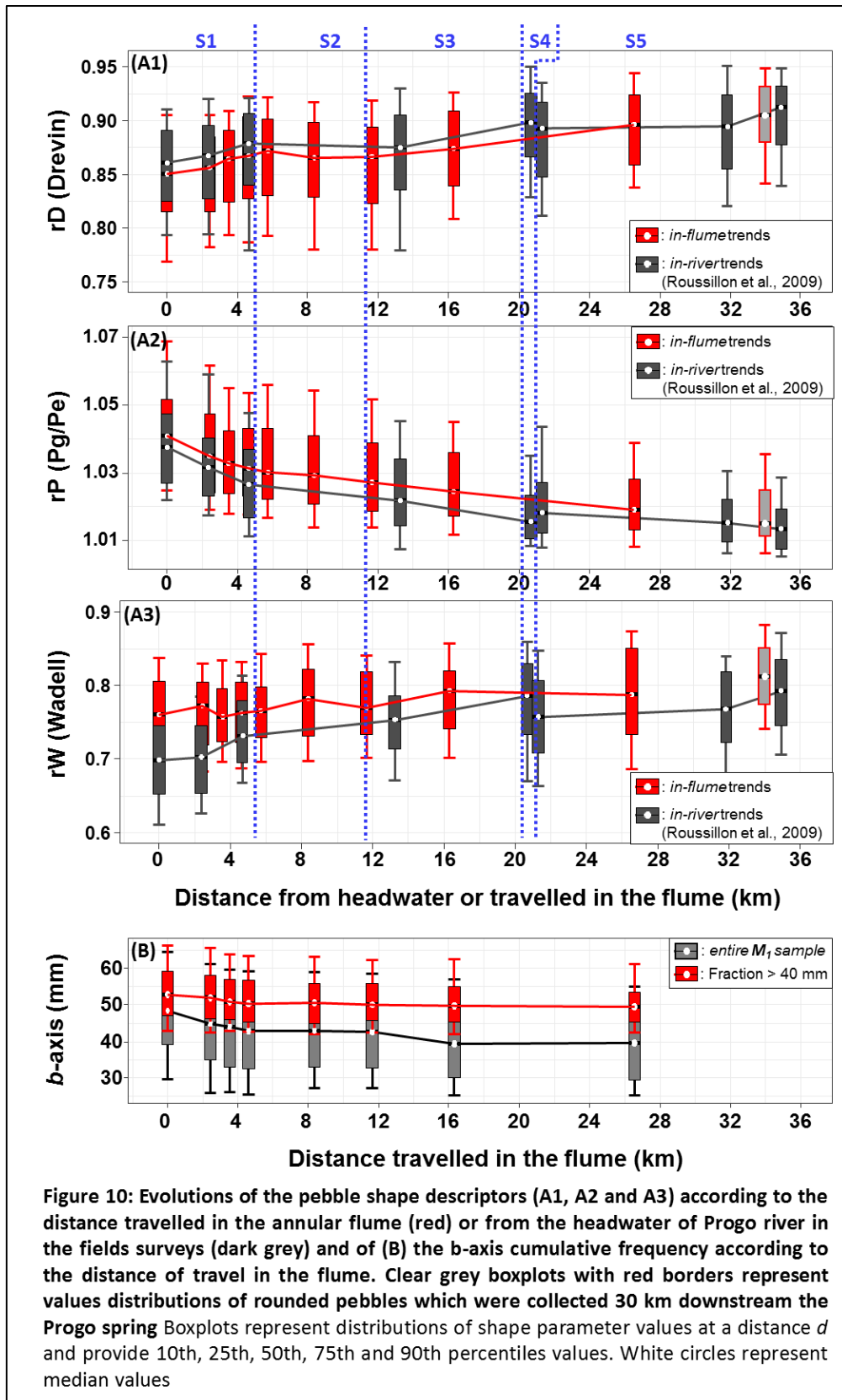
Figure 9: Pictures taken for roundness analysis of the angular pebbles sample  $M_1$  before (A) and after (B) abrasion runs.

Figure 74. Photographies de l'échantillon M1 (anguleux) avant (A) et après (B) les 8 expérimentations d'abrasion.

#### 4.3.2.1 Roundness metrics trends according to the travel distance

We also compared roundness changes for the field measurements along the first 30 km of the Progo River (Figure 10, Figure 75) and for the angular pebbles (sample  $M_1$ ) that traveled over a comparable distance in the annular flume. The roundness metrics of the  $M_2$  sample, collected 30 km downstream of the Progo River spring, were also considered. The  $b$ -axis plot (Figure 10-B, Figure 75-B) illustrates the evolution of the  $b$ -axis  $D_{50}$  of the angular pebble sample ( $M_1$ ) and of the fraction of this sample set with  $b$ -axes greater than 40 mm, which are used to establish the roundness metrics trends. The  $D_{50}$  of the whole angular pebble sample ( $M_1$ ) decreases with distance travelled, while that of the larger-sized fraction ( $b$ -axis  $>$  40 mm) used to establish the roundness metric trends remains stable (the fraction of the  $M_1$  sample with  $b$ -axes greater than 40 mm will be referred to as the “flume data” hereafter). Thus, the pebble breakage phenomenon that we expected effectively occurs under a relatively low flow rate: mainly between 0 and 5 km, and then, when discharge increases from  $240 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  to  $350 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , between 12 and 16 km.

Despite the slight differences observed in the  $rD$  and  $rP$  values between the field and flume data at the 0 km point, we can observe very similar trends between both observations. Indeed, both the lines are subparallel to the distance investigated. In contrast to the field observations, the flume roundness metrics exhibit reduced distribution ranges (*i.e.*, the gap between the 10<sup>th</sup> and 90<sup>th</sup> percentile values), translating to the homogenization of the particle roundnesses.



**Figure 75. Évolutions des descripteurs d'émoussé et de taille en fonction de la distance de transfert.**

Notes : Les courbes en rouge et en noir indiquent les données en fonction des distances en kilomètres, voyageées en canal et depuis la source de la rivière Progo respectivement. La boxplot gris clair aux moustaches rouges indique les valeurs de l'échantillon M2.



In the following analysis, we refer to five sectors along the distance traveled that we defined according to the changes in the roundness metric trends: *S1* ranges from 0 to 5 km, *S2* from 5 to 11.6 km, *S3* from 11.6 to 20.5 km, *S4* from 20.5 to 21.5 km and *S5* from 21.5 to 36 km.

The *rD* presents good agreement between both studies for *S1* and *S3* (Figure 10-A1, Figure 75-A1). In these sectors, the values of both studies increase as the roundness of the pebbles increases. Between 5.7 and 11.6 km for the flume data and between 5 and 13.5 km for the field data, we observe breaks in both trends. While the flume data values slightly decrease, the field data values remain stable. In *S3*, both the flume and field data exhibit new changes in trends with considerable increases in value. These trends remain stable until the 22 km (end of *S4*) and until the end of the experiment (*S4* and *S5*) for the field and flume data, respectively. The changes observed in the flume trends occur concomitantly with the increases in discharge (from  $240 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  to  $350 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) and mean particle velocity (from  $0.46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  to  $1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), after which the trend remains stable. At 13.25 km, the field data exhibit a change similar to that observed in the flume at 12 km. This break occurs 1 km downstream of the confluence of the two main tributaries, causing an increase of the Strahler order of the stream from 1 to 3 and of the watershed surface from 7.8 to  $59.5 \text{ km}^2$  (Figure 1, Figure 66). At the beginning of *S4*, the field trend shows a clear break and decreasing the agreement between both studies. Additionally, both trends show similar rounding of pebbles, especially considering that, in *S5*, the mean value of the **M<sub>2</sub>** sample (rounded pebbles sourced in 2014, 30 km downstream the Progo spring) is in line with the flume data trend observed between 11.6 and 26.5 km and is also in agreement with the field data collected in 2007.

The *rP* index shows a very strong agreement between both studies all along the investigated distance. Both trends exhibit rapid decreases in *S1* between 0 and 5.7 km and then a slower decrease in *S2* and *S3* between 5.7 and 20.5 km. The constant decreases of the *rP* values until 22 km confirm the pebble rounding. In contrast to *rD*, the *rP* values show no changes in trend at the end of sector *S2*. In *S4*, the field data present a tenuous break in trend that is not observed in the flume data. After 22 km, in *S5*, both trends become parallel. Again, the **M<sub>2</sub>** sample mean value is in line with the flume and field trends.

The *rW* values of the two sets present an important gap at 0 km, and the agreement between the two data sets is contrasting in the distances investigated. Both sets exhibit a slight increasing trend between 2 and 3 km. Then, the value of field data increases strongly while the flume values show slightly decreases, maybe because of the pebble breakage. After

5.7 km in S2 and S3, both trends slowly increase until 22 km. In S4, the field data presents a break in the trend. At this point, the field data values decrease before slowly increasing again in sector S5. In contrast to the previous roundness metric trends, the  $rW$  mean value of the sample  $M_2$  does not agree as well between both the field and flume data.

The comparisons of the field and flume trends of the three selected roundness metrics were computed using the Roussillon *et al.* (2009) toolbox and

- support the assumptions formulated by Roussillon *et al.*, (2009), i.e., that the field trend breaks were due to important changes in the Progo River bedload roundness and were caused by the input of the more angular pebbles from the shorter tributaries or bank erosion.
- showed that the increased hydraulic changes (higher velocity) affect the roundness. The increase in velocity by 413% is concomitant with the change of the  $rD$  index trends. This may indicate that the confluences not only affect the roundness distribution due to a sediment supply with more angular material but also change the hydraulic conditions and abrasions.

#### 4.3.2.2 Trends of $rP$ and $rD$ roundness metrics according to percentages of initial mass lost

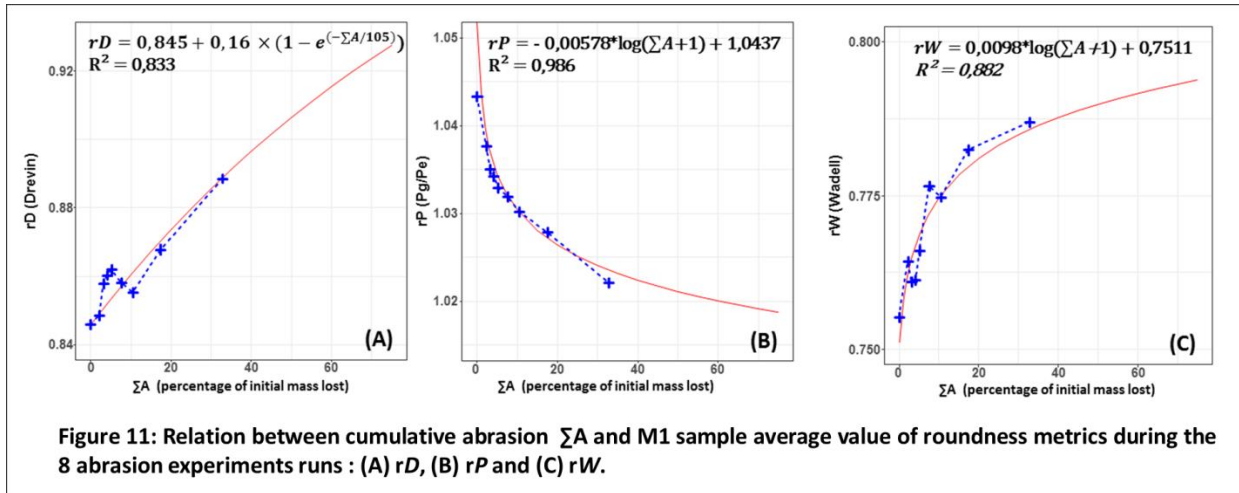
The values of the cumulative abrasion ( $\sum A$ , in percent of initial mass lost) and the trends exhibited by the mean values of  $rD$ ,  $rP$  and  $rW$  are plotted in Figure 11 (Figure 76). Both relationships show good agreements between the percentages of the initial  $M_1$  sample mass lost and the roundness metric values.

The model linking the  $rD$  and  $\sum A$  is defined by equation **E2**. This equation shows the strong relation ( $R^2 = 0.833$ ) between the mean Drevin roundness metric values and the abrasion of the  $M_1$  pebble sample.

$$rD = 0.845 + 0.16 \times \left( 1 - e^{\left(-\frac{\sum A}{105}\right)} \right) \quad (E2)$$

The model linking  $rP$  and  $\sum A$  is defined by equation **E3**. This equation shows a strong relation between the  $P_g/P_e$  roundness metric and the abrasion of the  $M_1$  pebble sample during the 8 abrasion experiment runs ( $R^2 = 0.967$ ). This second relation is more precise than the one linking  $rD$  and  $\sum A$ .

$$rP = -0.00578 \times \log(\sum A + 1) + 1.0437 \quad (E3)$$



**Figure 76. Relations entre l'abrasion cumulée (en % de la masse initiale perdue) au cours des 8 expérimentations d'abrasion et l'émoissé défini par les descripteurs  $rD$  (A),  $rP$  (B) et  $rW$  (C).**

*Notes : les valeurs d'émoissé sont des valeurs moyennes, les valeurs d'abrasion sont établis par multiplications des taux d'abrasion (mesurés par pesée) par les distances parcourues cumulées.*

The model linking  $rW$  and  $\Sigma A$  is defined by equation **E4**. This equation shows a strong relation between the  $rW$  (Wadell, 1932) roundness metric and the abrasion of the  $M_1$  pebble sample during the 8 abrasion experiment runs ( $R^2 = 0.882$ ). This third relation is a slight improvement over the one linking  $rD$  and  $\Sigma A$  but is inferior to the one linking  $rP$  and  $\Sigma A$ .

$$rP = -0.0098 \times \log(\Sigma A + 1) + 0.7511 \quad (\text{E3})$$

These results underline that the averaged values of the  $rD$ ,  $rP$  and  $rW$  roundness metrics are strongly linked to the percentage of pebble mass lost to abrasion.

## 4.4 DISCUSSION

### 4.4.1 About the practical tests

By comparing the advantages and disadvantages of the three roundness metrics investigated (Table 4), the following results are determined:

- The  $rD$  index shows some interesting advantages because it is poorly sensitive to picture enhancement and resolution but is sensitive to changes in sediment roundness. This allows for the targeting of sediment sources and the detection of slight changes in hydrodynamic conditions.

- The  $rP$  index also presents some interesting advantages for roundness studies aimed at detecting fresh bedload supplies with very strong links to mass loss; a smaller sample size is needed ( $n=20$ ), but this index has some sensitivity to resolution.
- The  $rW$  index is very sensitive to both the picture resolution and enhancement and presents a sensitivity to the geomorphologic changes that is difficult to interpret. Further analysis is needed to clarify these two points. One potential explanation is related to the averaging of the edges' radius values. Indeed, this averaging is sensitive to extremes values, such that a single high or low value can strongly affect the pebble  $rW$  index. Unfortunately, the toolbox does not provide all edge radii or the number of radii considered to compute the average.

Because pixel misclassifications during segmentation mainly occur at the pebble boundaries, the roundness metrics ( $rP$  and  $rW$ ) whose calculations use particle silhouette parameters are the most sensitive to picture enhancement, especially at the highest picture resolution. Conversely, the roundness metrics ( $rD$ ) whose calculations use particle silhouette area rather than perimeter are the least sensitive to picture enhancement at the picture resolutions investigated. Nevertheless, further tests with smaller pebbles investigating the sensitivities of the  $rD$  indexes to picture resolution and enhancement would be pertinent since smaller silhouette areas could be more influenced by misclassification.

**Table 5: Summary of advantages and limits of the three roundness metrics investigated.**

	$rP$	$rD$	$rW$
<b>Pebble position</b>	Insensitive	Insensitive	Insensitive
<b>Picture resolution</b>	Sensitive	Insensitive	Sensitive
<b>Picture enhancement</b>	Sensitive at high picture resolution	Poor sensitivity to the picture resolution	Sensitive at high picture resolution
<b>Estimation accuracy</b>	Good	Good	Poor
<b>Sensitivity/link to geomorphologic changes</b>	Median	High	Difficult to interpret
<b>Relation with <math>\sum A</math>, the cumulative percentage of mass lost</b>	Very good	Good	Good

**Tableau 27. Résumé des avantages et limites des 3 indices d'éroulé étudiés.**

For a picture resolution of 1600 x 1200 pixels (e.g., equivalent to 0.975 mm/pixels), as that investigated here with the given grain size, picture enhancement is not required.

It is crucial for future toolbox users to use pictures with the same resolutions, especially when considering  $rP$  and  $rW$ , when undertaking comparative analyses of roundnesses.

Our study of the roundness metric estimation accuracy relative to the effect and sample sizes is similar to that of Pissart *et al.*, (1998), which estimated that an average Cailleux roundness index with a precision of 4% et 10% can be obtained by measuring the roundness of 691 et 100 particles, respectively. Our results show that the roundness estimate error depends on the roundness index but needs to be considered in combination with the effect sizes, as reflected by the metrics. In our case, for instance, the real value of the  $b$ -axis in  $B_2$  is 97.7% of the real value of the  $b$ -axis in  $B_1$ , with ratios of 112.5, 104.9, and 97.7 for  $rD$ ,  $rW$  and  $rP$ , respectively. Among our three metrics,  $rP$  has the highest precision and accuracy. Hence, for  $rP$ , sample sizes as small as  $n=20$  should be enough to infer that the roundness of the pebbles in population  $B_2$  is greater than the roundness of the pebbles population  $B_1$ , since 95% of the absolute relative errors are less than 1%, even for  $n = 20$ .

Practical and flume experimental tests of roundness trends confirm the great need for the Roussillon *et al.* (2009) toolbox for river geomorphic diagnoses targeting sediment sources, the detection of changes in hydrodynamic transport conditions or even the tracing of the sediment histories of conglomerate series. Moreover, because this toolbox operates using a 2D picture taken with any camera commercially available of a pebble placed on a one-square-meter red board, data collection can be quickly and efficiently applied at a large scale. In addition, since this method computes a large set of size, shape and roundness metrics of particles, it will probably be very useful for researchers in different fields outside of geomorphology. The only inconvenience of this toolbox is that it still operates using command prompts without a graphical user interface.

#### **4.4.2 About flume experimental tests**

This study presents results that quantitatively link the particle roundness metric trends and abrasions caused by bedload transport. The results confirm potential links between mass loss and roundness changes and the accuracy of the space-time substitution approach for highlighting abrasion trends and supply. Nevertheless, both approaches should also be conducted together, which is now possible with the RFID technology in flumes because the distance patterns in flumes are strongly influenced by hydraulic conditions and bottom characteristics, both of which are crucial to mimic natural conditions.

The mean abrasion rates observed during the experiments with the annular flume (*i.e.*, 0.9%.km<sup>-1</sup> and 1.5%.km<sup>-1</sup>, respectively, for 240 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> and 350 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>) and those used to calculate the cumulative abrasion ( $\Sigma\mathbf{A}$ ) are expected to be 1.5- to 3-fold lower than those observed over an abrasive bottom (Attal *et al.*, 2009) that is supposed to mimic abrasion in a river. Thus, a very similar experiment with an abrasive bottom in the annular flume is of great interest to investigate the relations between abrasion and roundness trends. Similarly, it would now be of great interest to test whether the strong relationships observed for the andesite sourced from the Sundoro volcano are replicable with other lithologies.

To compare the rounding trends exhibited by the  $rD$  and  $rP$  mean values and the percentage of initial mass loss during the abrasion experiments runs, we needed to use the total mass of the M1 sample. Indeed, although we used mass estimates per grain size class to monitor mass evolution, the latter exhibited no clear trend because the erosion of the pebbles from the coarser grain size classes led to mass increases in the smaller grain size classes and, thus, to negative abrasion rates of these smaller grain size classes. This suggests the need for future abrasion experiments during which, in addition to the velocities and distances of transport, both the mass loss and roundness metrics of individual pebbles and their links to the evolution of particle geometry, mass and mobility behavior would be determined. To do so requires the individual identification of a large amount of monitored pebbles that would differ from passive RFID, since the distance monitoring by passive RFID requires a small number of tags to avoid RFID tag signal interference.

The 2D imagery approach used to compute roundness metrics in this study is powerful enough to detect changes in roundness linked to geomorphology and sediment transport conditions:

- The absence of the breaks in flume data, in contrast to those exhibited in sector S4 in the field data trends of  $rD$ ,  $rP$  and  $rW$ , confirms the assumption made by Roussillon *et al.* (2009) that attributes the fresh and angular sediment supply inputs into the Progo River to the Kali Galeh. Future studies are needed to investigate the toolbox potential to quantify the sediment supply of the tributaries presenting contrasting roundnesses. This could be tested by exhaustively sampling the upstream reaches of both tributaries in order to define their respective metric trends and the downstream reaches of their confluence.
- Both the flume and field changes in the  $rD$  index trends are concomitant with changes in hydraulic (*i.e.*, discharge in the flume case) and geomorphologic contexts, which is

not surprising because the dependences of abrasion rates (used to establish the cumulative percentage of mass lost) on transport stages and flood intensities have been noted by Attal and Lavé (2009). However, in the absence of additional evidence, we cannot conclude that changes observed in the flume or field  $rD$  trends are actually caused by the evolution of hydraulic or geomorphologic contexts. New flume experiments conducted with more runs exhibiting several gradual discharge increases are needed to test this hypothesis and to investigate the actual potential of the  $rD$  roundness index.

#### 4.5 CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The Roussillon *et al.* (2009) toolbox, which computes dozens of parameters using pebble size, shape and roundness imaged in 2D on a one-square-meter red board, has proved to be of great interest to the study of river functioning and the effects of sediment transport on particles in flumes as well as in rivers. This method does not need expensive material and is easy to implement when the recommendations formulated in this paper are followed. The toolbox now needs to be shared across the scientific community for its metrics to be tested in various geomorphologic contexts in order to identify its overall potential and collect additional user feedback. For this purpose, the toolbox and an exhaustive user guide are freely available on the ISIG web site [www.isig.org](http://www.isig.org).

The following recommendations are made for toolbox users:

- 1) Consider the pebble position either in face *a* or in face *b* (both defining the maximum projection plan defined by the *a*- and *b*- particle axes).
- 2) Take precautions during field sampling to avoid any time-consuming enhancements.
  - To avoid misclassification of pixels, a few precautions should be taken when taking the pictures: ensure the cleanliness of the red board and the dryness of the pebble surfaces and avoid direct light sources to reduce shadowing.
  - To avoid potential shadow clustering and the consequent pebble fusion, during pebble positioning, operators should maintain distance between pebbles greater than the *c*-axis of the pebbles.
  - To ensure the good delineation of the red board, avoid allowing the edges of the board from being too close to the borders of the picture frame, pebbles or any other elements, such as leaves or pieces of branch; conceal the borders of the red board.

- 3) Picture resolution should be standardized during all field measurements that will be used for further comparison analyses. If for any reason this standardization is not implemented, it is still possible to work with  $rD$ .
- 4) Sample sizes need to be set according to the hypothesized effect sizes and specific metrics considered. Moreover, because rounding mainly occurs during the first kilometers of travel in fluvial systems, the further from the sediment source, the larger the samples need to be to statistically reflect the changes in particle roundness. In our study, a hundred pebbles were sufficient to investigate and compare the roundness evolution in flumes and rivers.

Enhancements can have significant effects on roundness metrics distributions depending on the picture resolution and potentially on the investigated grain size. Thus, future users should consider picture enhancement using digital painting software to improve the colors of both pebbles and the contrasting red boards at their borders and iteratively process the digital painting, picture segmentation and observation of the picture copies of the pebble delineations produced by the toolbox during the segmentation step to ensure good delineation.

## **Acknowledgment**

This study was supported by a research grant from the French National Center of Scientific Research (CNRS) and Electricité de France (EDF) and by the project “Sediment-related Disasters following the 2010 eruption of Merapi Volcano, Java, Indonesia (2012 – 2015)” funded by AXA Research Fund”. The authors especially thank Jean-René Malavoi who actively supported the research efforts and Brice Noirot, who helped to test several parameters related to the toolbox functions.





# CHAPITRE 5 : ÉTUDE COMPARATIVE DE L'EFFET DE LA FORME ET DE LA DENSITÉ SUR LA MOBILITÉ DE PARTICULES GROSSIÈRES.

**Article numéro 4: En préparation**

## 5.1 INTRODUCTION

Sediment transport consider three moments in particle mobility: (1) the mobilization i.e. the initiation of displacement by rolling or sliding, (2) the motion as such and, (3) the deposit, when particle stops (Hjulström, 1935; Einstein, 1937). Due to the complex interactions between kinetic energy, collision, friction, drag and lift forces and their highly variable intensities in time and space, transport of sediment at the particles scale is a very stochastic phenomenon either in two or three spatial dimensions (Einstein, 1937; Ergenzinger and Schmidt, 1990; Busskamp, 1994; Habersack, 2001; Olinde, 2015; Olinde and Johnson, 2015). For practical reasons, empirical sediment transport functions widely use, in a deterministic approach, Shields Number ( $\tau^*$ ) and critical Shields Number ( $\tau_c^*$ ) to determine moments in which drag forces overpass particles stabilizing forces ( $\tau^* < \tau_c^*$ ) and thus particles are mobilized (Shields, 1936; Meyer-Peter and Müller, 1948; Engelund and Hansen, 1967; Ackers and White, 1973; Parker and Klingeman, 1982; Recking *et al.*, 2008; Piton and Recking, 2017). In such a deterministic approach, sediment particle stabilizing force is estimated through its b-axis (in mm) and its density (minus water density, in g.cm<sup>-3</sup>) since pioneer works of Meyer-Peter et Müller. When investigating sediment transport at the scale of a river reach, density is generally considered as homogeneous and b-axis is summarized to the median or, for the more integrative sediment transport models to several deciles of grainsize distributions (GSD) (Parker *et al.*, 1982; van Rijn Leo C., 1984; Rickenmann, 1991; Wilcock and McArdelell, 1993; Recking *et al.*, 2008; Recking, 2009). Thus, particle shape defined by ratios of the three particles axes (Zingg, 1935), is not considered in critical Shields Number formulae, while stochastic approaches emphasize it influences both probability of entrainment and travel length of particles. Indeed, both in-flume and fields studies reported a shape-selective coarse bedload transport depending on flood magnitude (Schmidt and Ergenzinger, 1992), bed roughness (Miller and Byrne, 1966; Komar and Li, 1986)(i.e. the D/K ratio where D is the diameter of the particles to be moved and K is the bed-particle diameter), particle size (Ashworth and Ferguson, 1989), angularity (Miller and Byrne, 1966; Carling *et al.*, 1992),

imbrication (Lane and Carlson, 1954; Li and Komar, 1986; Kirchner *et al.*, 1990) and GSD sorting (Buffington *et al.*, 1992). Coarse particles of spherical shape (i.e. spheres and ellipses) have entrainment and transport advantage in environment with ‘smooth bed’ ( $D > K$ ) and during low to moderate flood events (Schmidt and Ergenzinger, 1992). In ‘rough bed’ rivers ( $D \ll K$ ), the displacement of flatter shapes (i.e. discs and blades) is promoted by spanning gaps between clasts, lifting and sliding movements while spheres tend to lodge between clasts and are subject to hiding effects (Demir and Walsh, 2005). Selective shape entrainment and travel length decrease as flood magnitude increase and/or particle size decrease (Schmidt and Gintz, 1995). Stochastics studies emphasized that robust deterministic expression of initial motion must include definitions of particles shapes and bed roughness (White, 1940; Miller and Byrne, 1966; Buffington *et al.*, 1992; Carling *et al.*, 1992). In such a purpose, the lack of direct comparative analysis of density and shape respective influences on particle transport must be filled. The original association of two innovative methods, that are (1) monitoring sediment mobility in an annular flume equipped with a passive RFID reading system and (2) designing sediment particles of established shape and density, allows to carry out such a comparative study.

## 5.2 MATERIALS AND METHODS

We used a 3-D printer to create four models of particles of the grain-size class 45-64 mm (5.5-6.0  $\psi$ -units) and took a mold made-of silicon of them. Particle models were designed trading-off between all having the same volumes (Oakey *et al.*, 2005) ( $49.3 \text{ cm}^3$ ) and presenting shapes adjoining axes ratios of the Zingg’ shape classes (Table 1 and Fig.1 ; Tableau 28 and Figure 77). Then, for these four shapes, we manufactured artificial particles of four densities (namely: 2.0, 2.2, 2.4 and  $2.6 \text{ g.cm}^{-3}$ ) managed by improving the previous recipe (Cassel *et al.*, 2016) of a mixture of polyurethane, corundum and barium sulfate powders. Thus, we created a total of 16 types of artificial particles, and equipped them with Radio Frequency Identification transponders (model # RI-TRP-WR2B, also known as PIT Tag) to monitor their displacements in an annular flume (Attal *et al.*, 2006; Attal and Lavé, 2009) (number of laps achieved and times-per-lap). We ran a set of experiments designed (discharge:  $240 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ , total sample mass : 65 kg and grain-size class 45-64 mm) following previous studies observations (Attal and Lavé, 2009; Cassel *et al.*, 2016), with the aim to mimic bedload transport conditions at medium flow stage ( $\tau=130 \text{ Pa}$ ,  $\tau^*=0.16$ , mean transit velocity of  $\approx 0.4 \text{ m.s}^{-1}$  and sediment flux  $\approx 24 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ). For these conditions, particles

transport exhibits alternations of displacements at a mean hop velocity of about  $1.2 \text{ m.s}^{-1}$  and rests periods (Habersack, 2001) caused by temporary particles blockage and piling or by temporary immobilization preferentially along the inner part of the flume. Thus, even if flume bed roughness is considered to be low (Attal *et al.*, 2006) (the flume bottom, made of tires pieces, present non sliding conditions and roughness of  $< 1 \text{ cm}$ ), clusters formation and evacuation are inconstant in time and space. Experiments lasted about 45 min and were conducted in alternating the presence in the flume of the four monitored particles of a same density. This way we limited to four the number of transponders simultaneously present in the flume in order to avoid radio-frequency signals superposition and misdetection (Arnaud *et al.*, 2015; Cassel *et al.*, 2016; Chapuis *et al.*, 2014). A total of 6 and 5 runs were achieved for the densities 2.6 and 2.4, and for the densities 2.0 and 2.2, respectively. Finally, we compared lap-scaled velocities distributions and compute cumulative distances in time of the 16 artificial pebbles population to investigate respective effects of shape and density of the tagged particles.

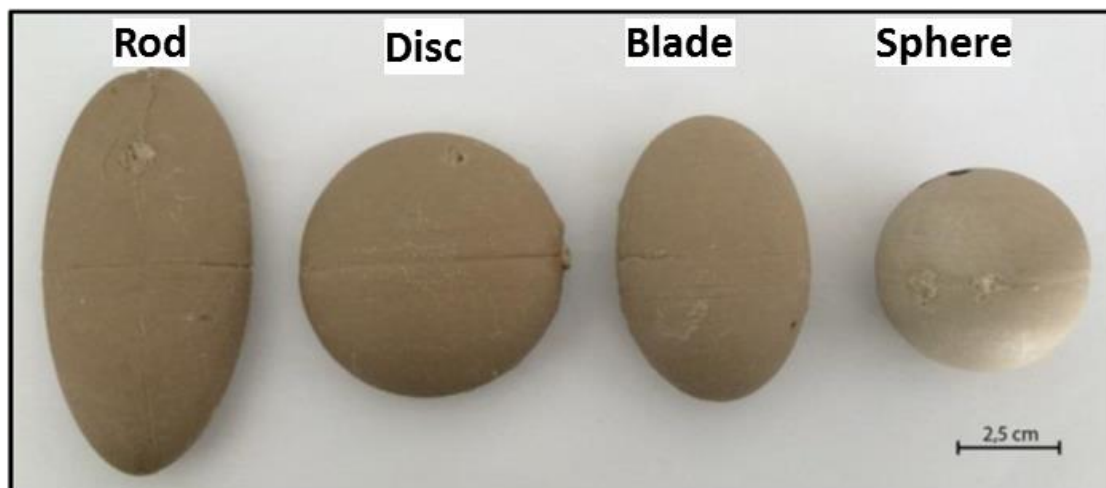


Figure 77. Photographie des 4 formes étudiées.

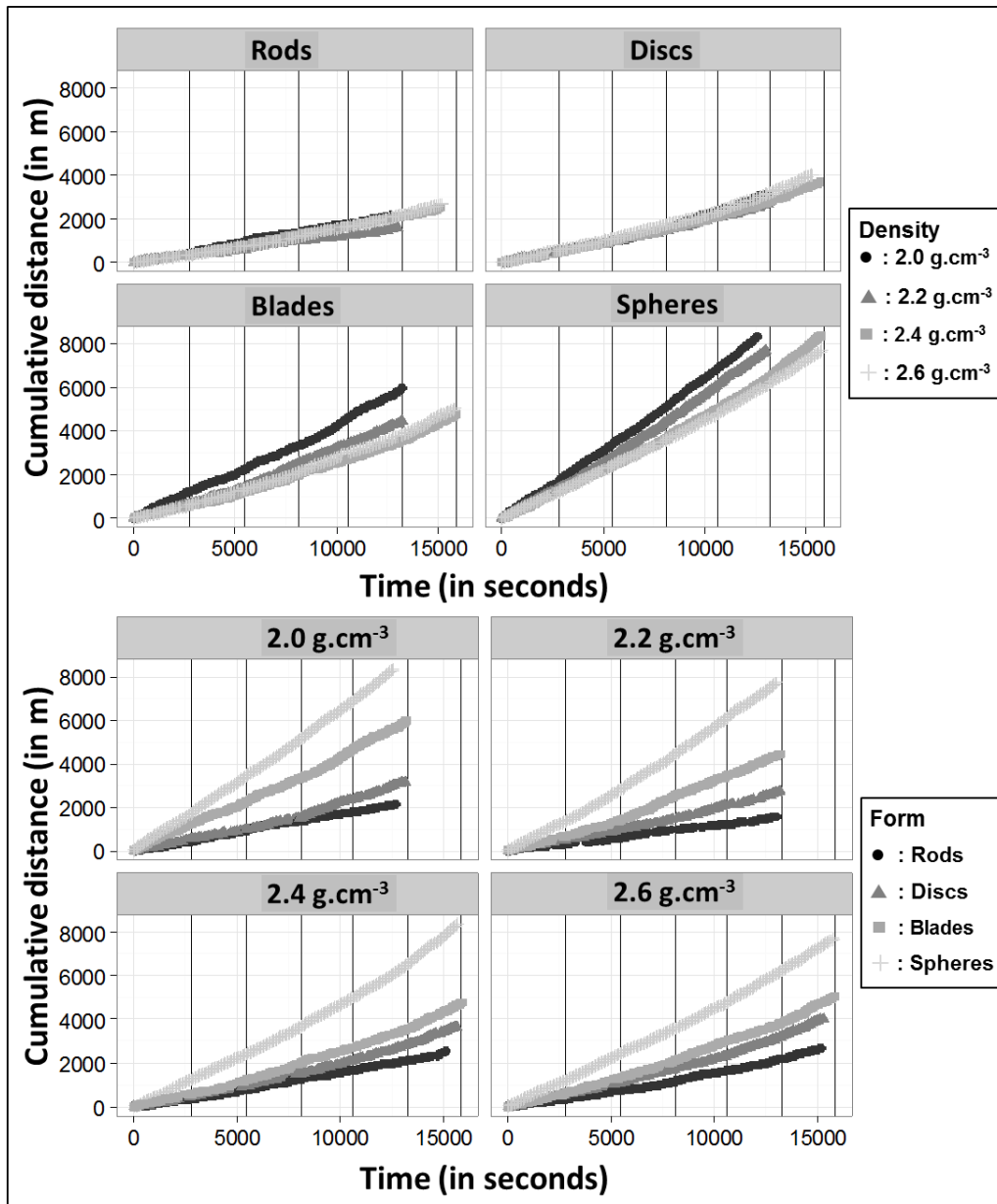
Shape	a-axis (mm)	b-axis (mm)	c-axis (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	b/a ratio measured VS Zingg	c/b ratio measured VS Zingg	Sneed and Folk (1958) Spherical Index
Blade	68.1	46	30	49.3	0.675 (<2/3)	0.65 (<2/3)	0.66
Sphere	45.5	45.5	45.5	49.3	1 (>2/3)	1 (>2/3)	1.00
Disc	65	63	23	49.3	0.97 (>2/3)	0.36 (<2/3)	0.51
Rod	97.2	46.1	21	49.3	0.47 (<2/3)	0.455 (>2/3)	0.46

Tableau 28. Caractéristiques physiques des 4 formes de particules étudiées.

### 5.3 RESULTS

The four particles' shapes (*e.g.* sphere, blade, disc, rods) investigated (Fig. 1; Figure 77) clearly exhibit contrasted mobility as well as sensibility to the density factor (Fig. 2-A; Figure 78). The spherical particles travel the farthest and fastest (mean velocities range from 0.60 to 0.44 m.s<sup>-1</sup>) and exhibit the greatest variability in mean velocities associated with particles density (0.16 m.s<sup>-1</sup>). The mean velocities of the 4 spherical particles, respectively 0.60, 0.52, 0.46 and 0.44 m.s<sup>-1</sup> for 2.0, 2.2, 2.4 and 2.6 g.cm<sup>3</sup>, decrease as the density increase. The blade shaped particles are the second fastest, exhibiting mean velocities ranging from 0.44 to 0.25 m.s<sup>-1</sup> that are also influenced by density, although to a lesser extent than spherical particles. In contrast, disc- and rod-shaped particles exhibit mean velocities poorly influenced by the density. Rods-like shaped particles are the slowest (mean velocities range from 0.14 to 0.17 m.s<sup>-1</sup>). Discs-like shaped particles are less influenced by density (mean velocities range from 0.19 to 0.21 m.s<sup>-1</sup>). Thus, density highly influence mobility of the sphere particles and, to a lesser extent, of ellipse particles but influence much more tenuously the mobility of rods and discs particles.

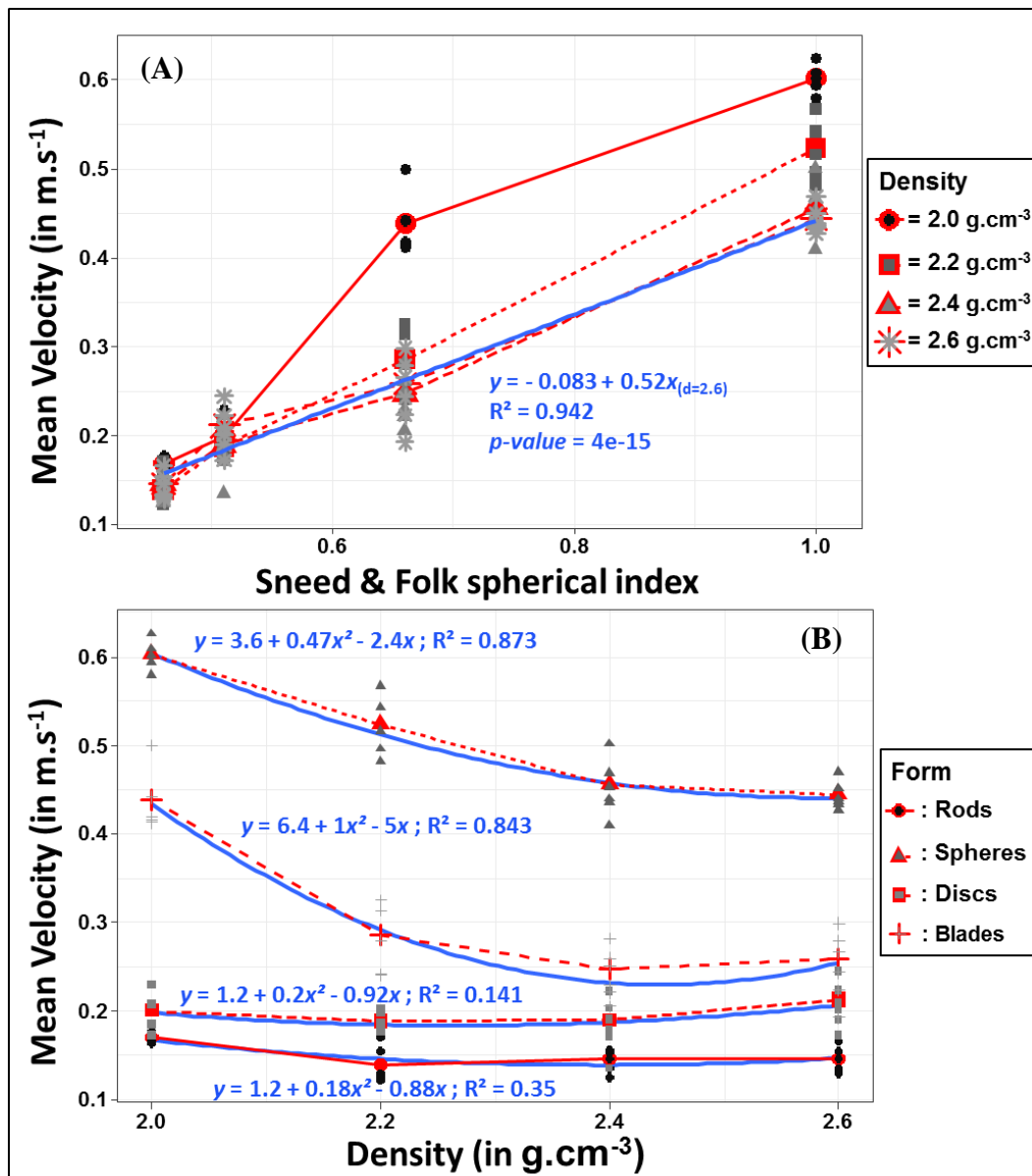
When comparing results within density classes, distances of travel show high variability associated to particle shapes whatever the density class (Fig. 2-B; Figure 78). However, mean velocities disparities related to particle shapes decrease slightly with the increase of density. For particle density of 2.0 g.cm<sup>-3</sup>, rod and disc exhibit comparable mean velocities (0.17 and 0.2 m.s<sup>-1</sup>, respectively) while blade and sphere travel 2 to 3.5 times faster (respectively 0.439 and 0.602 m.s<sup>-1</sup> for blade and sphere). Mean velocities of particle of 2.2 g.cm<sup>-3</sup> density are slightly lower than in previous density class but differences between shapes remain high: 0.139, 0.189, 0.286 and 0.524 m.s<sup>-1</sup> respectively for rod, disc, blade and sphere shapes. Within particle of 2.4 g.cm<sup>-3</sup>, disparity associated with particle shape remains high (about 0.31 m.s<sup>-1</sup>), although mean velocities of disc (0.190 m.s<sup>-1</sup>) and rod (0.147 m.s<sup>-1</sup>) increase while those of blade (0.248 m.s<sup>-1</sup>) and sphere (0.456 m.s<sup>-1</sup>) decreased compared to 2.2 density class. For particle of 2.6 g.cm<sup>-3</sup> density, despite lower differences between means particle velocities (0.147, 0.213, 0.259, 0.444 m.s<sup>-1</sup>, for rod, disc, blade and sphere respectively), variability associated to particle shape remain higher (about 0.30 m.s<sup>-1</sup>) than any of the variabilities associated to particle density previously observed (0.16 m.s<sup>-1</sup> observed in sphere-like shaped particles).



**Figure 78. Distances de transport cumulées en fonction du temps pour les 4 formes et 4 densités des particules étudiées.**

The Sneed and Folks's (1958) sphericity index ( $\Psi_p$ ) show remarkable relationship with the mean velocities values (Fig.3-A): mean velocities increase with sphericity index. Below  $\Psi_p = 0.5$  (e.g. rods and discs), there only tenuous variability in mean velocities at the run scale associated with particle density (respectively ranging from 0.122 to 0.177 m.s<sup>-1</sup> and from 0.135 to 0.244 m.s<sup>-1</sup>) while variability associated to density increase above  $\Psi_p = 0.5$  (respectively ranging from 0.241 to 0.499 m.s<sup>-1</sup> and from 0.409 to 0.625 m.s<sup>-1</sup>, for blade and spherical particles). Also particles with density of 2.6 exhibit a strong relation linking their  $\Psi_p$  and their means velocities (Fig.3-A). This relation suggests that it is possible to estimate

differences in mean velocities of particle presenting contrasted sphericity and could be used to predict particle mobility. Furthermore, when investigating relationship between density and mean velocities of the four investigated shapes, there are only small variations in mean velocities between 2.4 and 2.6 densities. This suggests that for higher densities (*e.g.* 2.8 g.cm<sup>-3</sup> as that exhibited by in river sediments) mean velocities of sediment particles would remain more strongly influenced by particles shapes than by density.



**Figure 79. Vitesse moyenne de transit des particules étudiées en fonction de la forme et de la densité.**

Notes : les vitesses sont fonction de : (A) leurs valeurs de l'indice de sphéricité de Sneed et Folk (1958) ou (B) de la densité (en g.cm<sup>3</sup>).

## 5.4 DISCUSSION

Observation of the particle mobility through the flume basal windows and the mean velocities of monitored particles, which are consistent with velocities measured in river in 2001 by Habersack (Habersack, 2001), support the good design of the experiments in order to reproduce the thrust process of bedload transport. Thus, lap-scaled transport velocities measured in this study integrate instantaneous speed during a certain number of successive hops and duration of rest periods before remobilization.

The greater mobility of the spheres and ellipses particles relative to rods and discs is in good accordance with the literature reporting preferential mobility of these shapes when  $D \leq K$  (Carling *et al.*, 1992; Demir and Walsh, 2005; Demir, 2000). This is also consistent with the flatness of the flume bottom or the temporal clustering sediment mass particles that constitute relatively ‘smooth’ bed roughness. The results of these experiments underline that particle mobility exhibit greater variability in relation to particle shapes than to their densities. This support and confirms on quantitative basis the previous assumption made by researcher community about the need to include particle shape parameter in sediment transport equation (Komar and Li, 1986; Li and Komar, 1986).

Indeed, when analyzing published bedload transport data sets, it is striking that rivers with very similar flow conditions, morphology and median grain size diameter can produce very different transport rates. The particle shapes, never described and accounted for in these data sets could be the missing link toward a full bedload transport description. One direct and important implication would be sediment transport prediction with formulae. Most bedload formulae were derived as a function of the excess shear stress  $\tau - \tau_c$  or of the transport stage  $\tau/\tau_c$  and can be resume (to make short) to two general forms which are respectively  $\Phi = A(\tau - \tau_c)^\alpha$  and  $\Phi = A(\tau/\tau_c)^\alpha$ . Whatever the formulation, they include the constant term  $A$  which could be considered an efficiency term. This term results from the equation calibration with bedload measurements, and implicitly incorporates the physical properties of the sediment mixture used for calibration, including an “average” shape. This efficiency term could be adapted with new experiments in order to incorporate explicitly the sediment shape, considered for instance as the ratio between  $a$  and  $c$  axes. Together with new measurements techniques allowing a direct access to the full grains geometry (photogrammetry, LIDAR), such new approach offer very promising perspectives for tackling the complex question of sediment transport in rivers.





## SYNTHÈSE

Dans le cadre de ce travail de thèse nous avons validé l'intérêt ou développé une série d'outils ou des associations d'outils adaptées à l'étude des processus du transport solide à différentes échelles spatio-temporelles. À l'échelle de la particule, les galets synthétiques, équipés de transpondeurs actifs ultra-hautes fréquences ou passifs basses fréquences, offrent de nouvelles perspectives pour le traçage sédimentaire de systèmes fluviaux encore peu équipés ou pour l'étude en canal des phases du transport solide. À l'échelle du tronçon fonctionnel, les transpondeurs actifs ultra-hautes fréquences représentent un outil innovant aussi bien pour la quantification des flux de sédiments que pour l'analyse des dynamiques des macroformes alluviales dans les systèmes fluviaux à la charge sédimentaire abondante. Ils constituent en outre une base pour de nombreux développements techniques et méthodologiques dans le domaine du traçage sédimentaire. Enfin, la combinaison de la toolbox de Roussillon *et al.* (2009) associée au suivi RFID basse fréquence dans le canal annulaire d'Attal (2003) a permis le développement d'une méthodologie aux perspectives nombreuses dont la gamme d'échelles spatiale s'étend de celle de la particule à celle du bassin versant et le panel de thématique de l'abrasion à celle du fonctionnement du système fluvial.

La synthèse de ce travail sera articulée autour des différents développements réalisés au cours de cette thèse. Elle traitera donc de la conception des galets synthétiques, des transpondeurs actifs ultra haute fréquence, de la toolbox de Roussillon *et al.* (2009) et de la combinaison du système RFID PIT tags avec le canal annulaire d'Attal (2003). Ce plan sera également suivi pour les perspectives et développements.

### **La conception de galets synthétiques.**

La technique de production de galets synthétiques offre de nombreux avantages. Elle permet la conception de traceurs :

- de forme(s) reproductible(s) (**MS4**) ;
- dont la densité est maîtrisée (**MS4**) ;
- qui ne se fracturent pas (**MS1**) ;
- pour un coût matériel faible : 3.5€/kg de galet, hormis le prix du dispositif de traçage (*e.g.* transpondeurs), le coût horaire de l'opérateur humain pour la fabrication et le coût du dispositif et matériel de moulage.

Toutefois, les galets synthétiques présentent l'inconvénient d'être assez sensibles à l'abrasion par attrition (**MS1**). En effet, indépendamment de l'éroulé (qui pourtant

influence l'abrasion des particules) mais à conditions de débit dans le canal annulaire égales, les taux d'abrasion de galets synthétiques (2.5%/km) sont bien supérieurs à ceux des particules calcaires de l'Ain: 0.3%/km en moyenne (calculée à partir de la perte de masse de chaque particule) ; et à celles des andésites de Java : 0.9%/km observé dans **MS3** (mesurée à l'échelle de l'ensemble de la masse sédimentaire). Malgré des biais liés aux différentes méthodes d'évaluation des taux d'abrasion (liés à des contraintes expérimentales), aux conditions d'état des particules naturelles au moment de l'expérience (émoussé vs anguleux et premières séquences usure vs n<sup>ième</sup> séquence usure) et à la nature de la masse sédimentaire accompagnante, il est indéniable que les galets synthétiques sont plus sensibles à l'abrasion par attrition que les lithologies étudiées dans le cadre de ces études (**MS1** et **MS3**).

Malgré cet inconvénient, la conception de galets synthétiques offre une solution technique :

- dans les environnements où la lithologie des sédiments est trop fragile, sujette à la fracture ou à la désintégration granulaire, pour permettre d'équiper des particules naturelles ;
- pour concevoir des traceurs :
  - de petite(s) taille(s) équipés des PIT tag de plus petite taille (*i.e.* 12- ou 23- mm de longueur) pour étudier les rivières à faible énergie ;
  - Ou de plus grande(s) taille(s) équipés de transpondeurs plus gros (RFID actives ou radio acoustique) ou de capteurs/détecteurs de mouvements.
- pour, comme dans notre étude (**MS4**), l'analyse comparative des effets de la forme et de la densité sur la mobilité des particules grossières, que ce soit en rivière ou en canal expérimental.

### **Les transpondeurs actifs ultra hautes fréquences pour le suivi de la mobilité des galets**

Ce travail (**MS2**) a montré que l'emploi des transpondeurs RFID actifs ultra hautes fréquences (*i.e.* a-UHF ; 433.9 Mhz) pour équiper des galets synthétiques ou naturels permet le développement de traceurs sédimentaires aux performances intéressantes (durée de vie pluriannuelle, précision de positionnement bien qu'ayant une grande distance de détection, détection en situation d'immersion ou d'enfouissement). Ils sont particulièrement adaptés pour des systèmes fluviaux actifs ou de grands cours d'eau, avec une charge sédimentaire grossière abondante, des hauteurs d'eau relativement faibles (*e.g*  $\approx$  1 mètres) et qui présentent de grandes surfaces à prospector. Ils constituent notamment une solution intéressante pour

l'étude du transport solide et du déplacement des macroformes dans des rivières en tresses ou des torrents dans lesquels les traçages par PIT Tags (RFID passive basse fréquence) restent limités en raison de la diffusion rapide ou de l'enfouissement des traceurs. En effet, ce travail (MS1) a montré que la destruction des traceurs équipés de PIT Tags, du moins ceux confectionnés à partir de particules naturelles calcaires, semble être un phénomène marginal au regard des taux de retour rapportés dans la littérature. De plus, la fracturation ainsi que l'examen des particules à la recherche de discontinuités matérielles au moment de la confection des traceurs permettent l'exclusion des particules naturelles qui sont susceptibles de fracturer au cours du transport par charriage, une fois les traceurs injectés sur le site d'étude. Ces transpondeurs a-UHF représentent une opportunité d'étude de la mobilité des macroformes telles que les bancs, les nappes ou les langues de charriage de l'échelle de la macroforme voire à celle de tronçons fonctionnels.

L'association des galets synthétiques et des transpondeurs a-UHF, a fait l'objet d'un dépôt de savoir-faire secret par le service valorisation de l'ENS et a été primée aux Victoires de l'innovation 2016 dans la catégorie Innovation environnementale. Cela n'a pas empêché son déploiement dans le cadre de diverses collaborations scientifiques.

### **Pertinence de la toolbox de Roussillon *et al.* (2009) pour l'étude de l'éroussé.**

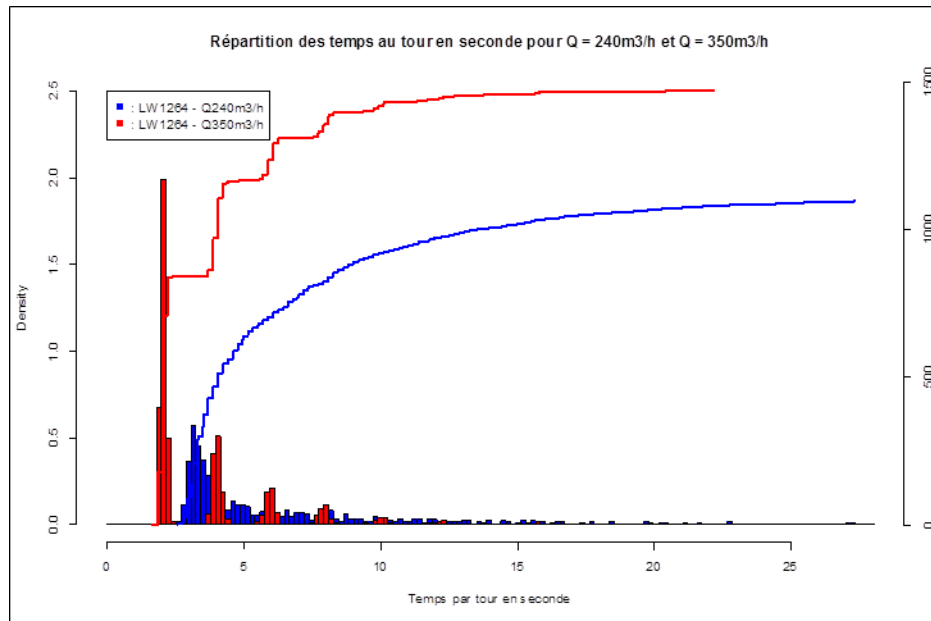
Ce travail a confirmé la pertinence de cet outil pour la mesure d'une douzaine d'indice d'éroussé de particules sédimentaires grossières disposées et photographiées en 2D sur une plaque de couleur rouge d'un mètre carré. La toolbox est particulièrement adaptée aux études de terrain car elle ne nécessite qu'une manipulation minimale des particules et évite tout transport des galets vers le laboratoire pour de plus amples mesures ou analyses. En outre, cette étude (MS3) a montré l'importance de respecter un protocole. Plusieurs recommandations à la fois sur le terrain (séchage et disposition des particules) puis lors de l'analyse des photographies (résolution graphique principalement) ont été formulées. Si ces éléments sont pris en considération, les données récoltées présentent un intérêt pour le diagnostic du fonctionnement géomorphologique de systèmes fluviaux ou pour l'identification et la quantification de processus d'abrasion des particules sédimentaires grossières.

## **Systeme RFID et canaux experimentaux.**

L'installation du systeme PIT Tag dans le canal annulaire de Attal (2003) permet d'y mesurer les vitesses et distances de deplacement de particules sedimentaires afin notamment de :

- rapprocher ces donnees de mobilite a des donnees d'abrasion et d'émoussé des particules, et ainsi de proposer pour la premiere fois, des relations quantitatives entre des indices d'émoussé en 2D et l'abrasion d'une masse sedimentaire au cours de son transport (**MS2**) ;
- d'analyser les effets de la forme et de la densite de particules synthetiques sur leur mobilite (**MS4**) et de :
  - mettre en evidence la forte influence de la forme comparativement a celle de la densite ;
  - confirmer les observations *in situ* de Demir (2000) et Demir et Walsh (2005) relatant le transport preferentiel des particules spheriques et elliptiques par rapport aux formes aplaties et allongees lorsque la surface du fond (du lit ou du canal) est relativement lisse.

Toutefois, ce systeme presente une limite. Parce qu'il est passif et qu'il fonctionne par cycle d'emission/detection, son efficacite pour le suivi par antennes fixes est dependante de la vitesse des particules. Ainsi, lors d'experiences a debit eleve ( $Q = 350\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ ) dans le canal annulaire, la distribution des temps de detection presentait des pics a intervalle reguliers (de l'ordre de deux secondes) qui tranche avec l'occurrence d'un phenomene hasardeux qui tend plutot a presenter une loi de distribution normale (Figure 80).



**Figure 80. Densité des temps au tour mesurés à débits faibles ( $240\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ ) et élevés ( $350\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ ).**

Cela traduit des ratés de détection causés par la trop grande vitesse des traceurs qui traversent le champ d'influence (émission/détection) de l'antenne trop rapidement. Les transpondeurs de ces traceurs ne restent pas suffisamment de temps dans le champ de l'antenne pour être chargés totalement puis d'émettre dans le créneau temporel imparti à leur réponse. Nous avons recommandé (**MS1**) que les dimensions d'une antenne fixe soient déterminées en fonction d'estimations des vitesses des particules tracées. Au minimum, les traceurs équipés de PIT tag doivent rester dans le champ de l'antenne pendant 2 cycles complets du système RFID (e.g. 0.18 secondes).



## PERSPECTIVES ET DÉVELOPPEMENTS FUTURS

### **La conception de galets synthétiques.**

Les conditions d'utilisation des galets synthétiques pour l'étude du transport solide nous ramènent à la question soulevée par Oakey *et al.* (2005) quant à leur représentativité en terme de forme vis-à-vis de la population étudiée. La question est pertinente dans une optique de caractériser le fonctionnement d'un cours d'eau précis. Mais, il serait également intéressant de considérer l'intérêt d'un lot d'une ou plusieurs particules « étalon » aux formes spécifiques, qui seraient produites aux tailles correspondantes à la granulométrie des cours d'eau étudiés. Cette approche offrirait la possibilité de comparer les distances parcourues par les mêmes traceurs (forme et taille) au cours de crues d'intensité variable mais aussi dans les différents contextes hydrosédimentaires des systèmes étudiés. Avec des échantillons statistiques suffisamment robustes, de telles données pourraient révéler des similarités ou des différences entre les systèmes étudiés ou les événements morphogènes observés. Cela constituerait des éléments de discussion pour comparer la variabilité des distances de transport observée dans les études de traçage sédimentaire en rivière.

Une telle approche pourrait en outre permettre de comparer le rôle respectif de l'entraînement sélectif lié à la taille, à la forme ou celui de l'abrasion (puisque la relation entre les taux d'abrasion et les indices d'émoussé semble pouvoir être calibrée pour une lithologie donnée), sur le *continuum* d'un cours d'eau et de modéliser l'évolution des caractéristiques de la masse sédimentaire à mesure de sa progression dans le système fluvial. Il pourrait ainsi être possible d'étudier en milieu fluvial l'interdépendance entre transport préférentiel lié à la forme et l'abrasion, suggérée par Jerolmack *et al.* (2011) sur des dunes sableuses.

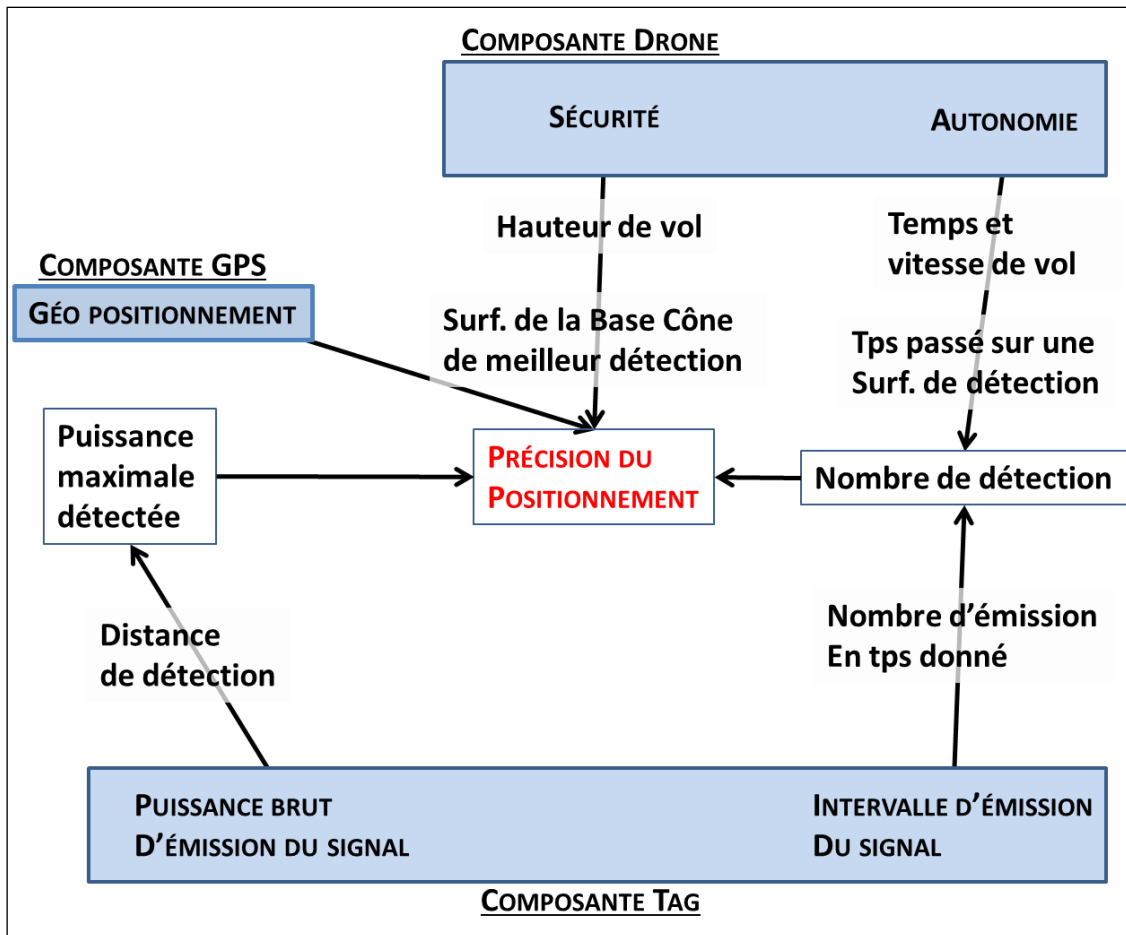
### **Les transpondeurs actifs ultra hautes fréquences pour le suivi de la mobilité des galets**

En termes de perspective technique et méthodologique, la recherche de traceurs équipés de transpondeurs ELA à l'aide d'un système embarqué sur un drone devrait être testée rapidement. Elle pourrait permettre d'effectuer des suivis rapides, répétés ou dans des zones à risques pour des opérateurs à pied et ce sur des surfaces importantes. Pour ce faire, il convient d'étudier les avantages et inconvénients d'une telle technique de recherche en considérant (Figure 81):

- la précision de positionnement des traceurs. Celle-ci est notamment liée :
  - à la hauteur au sol de l'antenne,



- à la puissance et à l'intervalle d'émission du signal radio du transpondeur,
- et à la précision du GPS embarqué sur le drone
- les conditions de sécurité de vol et d'autonomie en vol du drone qui sont en partie conditionnées par le site d'étude (vallée encaissée ou ouverte, présence/absence de végétation basse ou haute, forêt rivulaire, etc...) et la météorologie.



**Figure 81. Composantes essentielles à la réalisation d'une recherche des transpondeurs a-UHF par drone.**

L'adaptation du système de détection sur un drone (Figure 82) permet déjà les premiers vols d'essais pour calibrer vitesses et hauteurs de vol et entamer une réflexion sur la précision des positions estimées en fonction dans différentes configuration de vols.

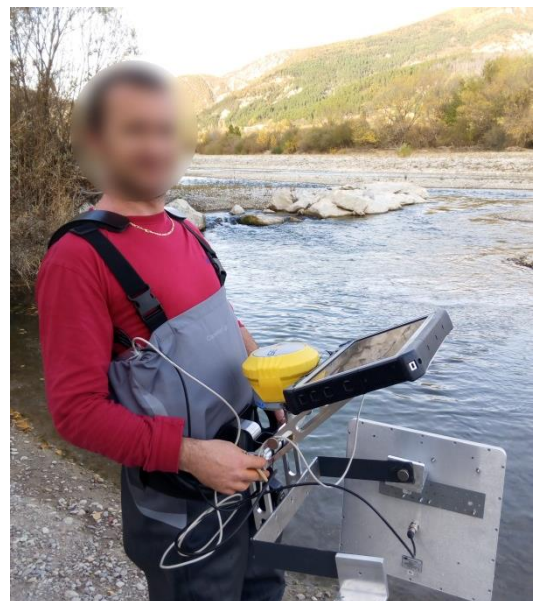
**Figure 82. Adaptation du système de détection des transpondeurs a-UHF sur un drone.**

*Notes : 1) l'antenne ; 2) le lecteur.*



Les perspectives techniques incluent également le développement pour la prospection pédestre :

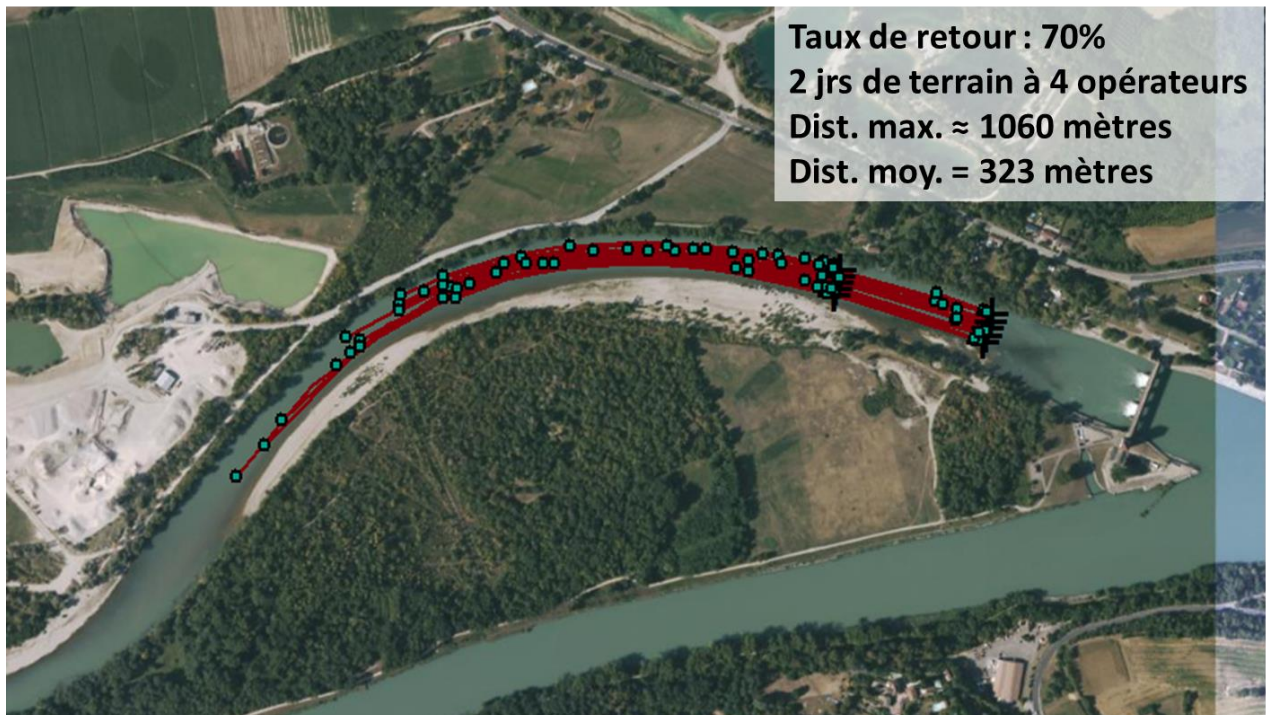
- de solution matériel (portage des systèmes de détection RFID et GPS) est en cours de finalisation. Celle-ci doit permettre la recherche des transpondeurs sur les zones émergées des bancs de galet par un seul opérateur dans des conditions de confort relatives (Figure 83).
- et d'une solution logiciel pour l'enregistrement simultané au sein d'une seule et unique base de données des informations RFID et GPS est déjà achevée mais son emploi peut encore être rendu plus ergonomique afin d'apprécier directement sur le terrain la qualité de positionnement des transpondeurs détectés et d'informer l'opérateur de l'évolution du taux de retour à mesure de la prospection de la zone d'étude ;



**Figure 83. Photographie d'un harnais de transport du GPS et du système a-UHF RFID.**

D'un point de vue appliqué, les perspectives peuvent être appréhendées au travers de divers déploiements de ces traceurs :

- sur le site du barrage de Jons formant la diffluence entre le canal de Miribel et le Rhône (Projet OSR 4 axe 1):
  - injection au cours du mois d'octobre 2016 (05 et 06 octobre 2016) et
  - premier suivi (29 et 31 mars 2017)
  - résultats préliminaires : taux de retour de 70% pour 8 journées opérateurs et distance maximale, moyenne et médiane d'environ 1066, 323 et 715 mètres respectivement (Figure 84).



**Figure 84. Trajectoires des traceurs observées après le premier suivi sur le site amont du canal de Miribel.**

- au niveau de la brèche du vieux Rhône de Néron (Collaboration avec le bureau d'étude GINGER BURGEAP):
  - injection (12 janvier 2017) ;
  - premiers suivis (24 mars et 03 avril 2017) ;
  - résultats préliminaires : taux de retour de 45% pour 5 journées opérateurs et distance maximale et médiane d'environ 261 et 103 mètres respectivement.

Les données obtenues au cours de suivis successifs des traceurs injectés sur ces sites d'étude seront confrontées aux données hydrologiques et bathymétriques afin d'analyser le comportement de la charge de fond au niveau de ces deux diffluences connectées par le biais du canal de Miribel dont la bonne gestion répond par ailleurs à plusieurs enjeux :

- l’approvisionnement en eau potable de la ville de Lyon, puisque la nappe phréatique, qui constitue la principale source d’approvisionnement du champ de captage de Crépieux-Charmy, est dépendante de la dynamique des bras du Rhône ;
- la zone de loisir du Grand Parc de Miribel Jonnage dont le niveau du lac est dépendant du niveau d’eau dans les bras du Rhône ;
- le transit sédimentaire au travers de la ville de Lyon qui est pour l’instant limité par un piège à sédiment en amont de la ville qui capte une partie des apports grossiers provenant du canal de Miribel.

### **Pertinence de la toolbox de Roussillon et al. (2009) pour l’étude de l’émoussé.**

Cet outil performant pourrait dès à présent être mis à la disposition de la communauté scientifique. Toutefois, l’absence d’une interface graphique d’utilisation rend son emploi par des utilisateurs non-initiés un peu compliquée. En effet, les quelques mises à disposition entreprises auprès de plusieurs étudiants visiblement motivés, ont montré une certaine fébrilité de ces utilisateurs. Mais une rapide formation (1h tout au plus) à deux devant le poste de travail (le novice et le coutumier), permet au novice de développer les compétences et la confiance nécessaires à une utilisation sereine lui permettant d’exploiter le plein potentiel de l’outil. La formalisation d’un précis d’utilisation étape par étape et/ou d’une vidéo tutoriel, pourraient permettre une auto-formation des futurs utilisateurs. Une autre solution serait l’intégration des composants de l’algorithme dans une interface graphique d’utilisation plus facile à appréhender.

La toolbox devrait alors permettre de nombreuses études à la fois en canal (*e.g.* **MS3**) et/ou en rivière (Roussillon *et al.*, 2009) à différentes échelles spatiales. Il serait notamment intéressant :

- de quantifier grâce aux indices d’émoussé les processus d’abrasion générés par le charriage à l’échelle de la particule sédimentaire et non plus à celle de la masse sédimentaire entière ;
- de tester si les bonnes relations entre indices d’émoussé et abrasion observées à l’échelle de la masse sédimentaire pour les andésites peuvent être transposées à d’autres lithologies ;
- ou de développer un modèle, similaire à celui d’Attal et Lavé (2006), spatialisé à l’échelle d’un bassin versant tenant compte des contributions des différents tributaires, des lithologies relevées, des processus de transport observés et quantifiant les

processus d'abrasion sur les particules ou la masse sédimentaire dans son ensemble, agissant dans les différents compartiments d'un tel système. Un tel modèle pourrait alors permettre de déterminer le devenir des particules sédimentaires selon leurs origines ou à l'inverse déterminer l'origine des particules sédimentaires selon leurs propriétés.

### **Système RFID et canaux expérimentaux.**

Le système PIT tag (RFID passive basse fréquence) permet de mesurer les vitesses et distances de déplacement de particules sédimentaires dans le canal annulaire Attal (2003) offre pour perspectives :

- confirmer les taux d'abrasion (en pourcentage de masse perdue par kilomètre parcourue et noté en %/km) de masses sédimentaires ainsi que des dépendance du taux d'abrasion aux vitesses de transfert, à la nature du fond, etc... rapportés par Attal (2003) et Attal et Lavé (2006).
- d'étudier comment évolue la relation entre l'éroulé et l'abrasion d'une masse sédimentaire en fonction de sa lithologie en répétant les expériences présentées dans cette étude (**MS3**) avec d'autres lithologies plus ou moins résistantes.
- d'analyser la variabilité des processus d'abrasion en étudiant les relations entre éroulé et abrasion à l'échelle des particules sédimentaires individualisées, en comparant des mesures de déplacement (vitesse et distance), de variation de poids (taux d'abrasion en %/km), et d'éroulé (caractérisé par les indices d'éroulé mesuré avec la toolbox de Roussillon *et al.* (2009)).

Le défi principal réside dans le fait d'être capable d'identifier un nombre suffisamment grand de particules entre les expérimentations successives d'abrasion afin de pouvoir relier pour chacune d'elles les variations de poids et celles des indices éroulé (considérant que les données de mobilité sont obtenues grâce à un suivi par PIT tag d'un plus petit nombre de particules représentatives de l'ensemble de l'échantillon, puisqu'un trop grand nombre de PIT tag présents simultanément dans le canal augmente les risques de collision des signaux radio).

- de tenter de modéliser les différentes phases du transport par charriage d'une particule: vitesse et durée des déplacements, fréquence et durée des temps d'arrêt.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACKERS P, WHITE WR. 1973. Sediment transport : New approach and analysis. *Journal of the Hydraulics Division* **99** [online] Available from: <https://trid.trb.org/view.aspx?id=103329> (Accessed 13 September 2017)
- ADAMS J. 1979. Gravel Size Analysis from Photographs. *Journal of the Hydraulics Division* **105** : 1247–1255.
- ALBER A. 2012. Etude multi-scalaire de la dynamique latérale des tronçons fluviaux- Application au bassin rhodanien, Thèses, Université Lumière Lyon 2: Lyon
- ALLAN JC, HART R, TRANQUILI JV. 2006. The use of Passive Integrated Transponder (PIT) tags to trace cobble transport in a mixed sand-and-gravel beach on the high-energy Oregon coast, USA. *Marine Geology* **232** : 63–86. DOI: 10.1016/j.margeo.2006.07.005
- ALLEN J. 1947. Scale models in hydraulic engineering . London : Longmans [online] Available from: <http://trove.nla.gov.au/version/20790843> (Accessed 9 August 2017)
- ALLEN JRL. 1989. A quantitative technique for assessing the roundness of pottery sherds in water currents. *Geoarchaeology* **4** : 143–155. DOI: 10.1002/gea.3340040204
- AMOROS C, PETTS GE (eds). 1993. Hydrosystèmes fluviaux . Paris, France
- ARNAUD F. 2012. Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne), Theses, Université Lumière Lyon 2: Lyon [online] Available from: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00833042/>
- ARNAUD F, PIÉGAY H, BÉAL D, COLLERY P, VAUDOR L, ROLLET A-J. 2017. Monitoring gravel augmentation in a large regulated river and implications for process-based restoration. *Earth Surface Processes and Landforms* DOI: 10.1002/esp.4161 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/esp.4161> (Accessed 13 September 2017)
- ARNAUD F, PIÉGAY H, VAUDOR L, BULTINGAIRE L, FANTINO G. 2015. Technical specifications of low-frequency radio identification bedload tracking from field experiments: Differences in antennas, tags and operators. *Geomorphology* **238** : 37–46. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.02.029
- ASCHENBRENNER BC. 1956. A new method of expressing particle sphericity. *Journal of Sedimentary Research* **26** : 15–31. DOI: 10.1306/74D704A7-2B21-11D7-8648000102C1865D
- ASHCROFT W. 1990. Beach pebbles explained. *Nature* **346** : 227–227. DOI: 10.1038/346227c0
- ASHWORTH PJ, FERGUSON RI. 1989. Size-selective entrainment of bed load in gravel bed streams. *Water Resources Research* **25** : 627–634.
- ATTAL M. 2003. Erosion des galets des rivières de montagne au cours du transport fluvial: étude expérimentale et application aux réseaux hydrographiques d'orogènes actifs, Université Joseph-Fourier-Grenoble I [online] Available from: <http://tel.archives->

ouvertes.fr/documents/archives0/00/00/40/97/tel-00004097-00/tel-00004097.pdf (Accessed 11 December 2014)

ATTAL M, LAVÉ J. 2006. Changes of bedload characteristics along the Marsyandi River (central Nepal): Implications for understanding hillslope sediment supply, sediment load evolution along fluvial networks, and denudation in active orogenic belts. In *Special Paper 398: Tectonics, Climate, and Landscape Evolution*, Geological Society of America; 143–171. [online] Available from: [http://specialpapers.gsapubs.org/cgi/doi/10.1130/2006.2398\(09\)](http://specialpapers.gsapubs.org/cgi/doi/10.1130/2006.2398(09)) (Accessed 5 February 2015)

ATTAL M, LAVÉ J. 2009. Pebble abrasion during fluvial transport: Experimental results and implications for the evolution of the sediment load along rivers. *Journal of Geophysical Research* **114** DOI: 10.1029/2009JF001328 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2009JF001328> (Accessed 11 December 2014)

ATTAL M, LAVE J, MASSON JP. 2006. New Facility to Study River Abrasion Processes. *Journal of Hydraulic Engineering* **132** : 624–628. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:6(624)

BAGHERI GH, BONADONNA C, MANZELLA I, VONLANTHEN P. 2015. On the characterization of size and shape of irregular particles. *Powder Technology* **270, Part A** : 141–153. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.10.015

BARRETT PJ. 1980. The shape of rock particles, a critical review. *Sedimentology* **27** : 291–303. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1980.tb01179.x

BARRIÈRE J, KREIN A, OTH A, SCHENKLUHN R. 2015. An advanced signal processing technique for deriving grain size information of bedload transport from impact plate vibration measurements: a signal processing technique for deriving grain size of bedload. *Earth Surface Processes and Landforms* **40** : 913–924. DOI: 10.1002/esp.3693

BEDDOW JK. 1988. Morphological Analysis of Particles and Microstructure. *Key Engineering Materials* **29–31** : 677–696. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.29-31.677

BELLEUDY P, VALETTE A, GRAFF B. 2010. Passive hydrophone monitoring of bedload in river beds: first trials of signal spectral analyses. USGS, Scientific Investigations Report **5091** [online] Available from: <http://lthe.fr/UserFiles/File/Belleudy%20et%20al%20.pdf> (Accessed 13 September 2017)

BELLEUDY P, VALETTE A, GRAFF B. 2014. Monitoring of bedload in river beds with an hydrophone: first trials of signal analyses [online] Available from: [https://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/99836/1/C5\\_10.pdf](https://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/99836/1/C5_10.pdf) (Accessed 13 September 2017)

BENELLI G, PANZARDI E, POZZEBON A, BERTONI D, SARTI G. 2011. An analysis on the use of LF RFID for the tracking of different typologies of pebbles on beaches. 426–431 pp. [online] Available from: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6068673](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6068673) (Accessed 11 December 2014)

BENELLI G, POZZEBO A. 2013. RFID Under Water: Technical Issues and Applications. In *Radio Frequency Identification from System to Applications*, Reaz MIB (ed). InTech; [online] Available from: <http://www.intechopen.com/books/radio-frequency-identification->

from-system-to-applications/rfid-under-water-technical-issues-and-applications (Accessed 4 February 2016)

BENELLI G, POZZEBON A, BERTONI D, SARTI G, CIAVOLA P, GROTTOLI E. 2012. An Analysis of the Performances of Low Frequency Cylinder Glass Tags for the Underwater Tracking of Pebbles on a Natural Beach. 72–77 pp. September [online] Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6353851> (Accessed 11 December 2014)

BENELLI G, POZZEBON A, RAGUSEO G, BERTONI D, SARTI G. 2009. An RFID Based System for the Underwater Tracking of Pebbles on Artificial Coarse Beaches. 294–299 pp. June [online] Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5210901> (Accessed 11 December 2014)

BENN DI, BALLANTYNE CK. 1994. Reconstructing the transport history of glacial sediments: a new approach based on the co-variance of clast form indices. *Sedimentary Geology* **91** : 215–227.

BERTOLDI W, PIÉGAY H, BUFFIN-BELANGER T, GRAHAM D, RICE S. 2012. 15 Applications of Close-range Imagery in River Research. In *Fluvial Remote Sensing for Science and Management* , . 341–366.

BERTONI D, SARTI G, GROTTOLI E, CIAVOLA P, POZZEBON A, DOMOKOS G, NOVÁK-SZABÓ T. 2016. Impressive abrasion rates of marked pebbles on a coarse-clastic beach within a 13-month timespan. *Marine Geology* **381** : 175–180. DOI: 10.1016/j.margeo.2016.09.010

BIRON PM, CARVER RB, CARRÉ DM. 2012. SEDIMENT TRANSPORT AND FLOW DYNAMICS AROUND A RESTORED POOL IN A FISH HABITAT REHABILITATION PROJECT: FIELD AND 3D NUMERICAL MODELLING EXPERIMENTS. *River Research and Applications* **28** : 926–939. DOI: 10.1002/rra.1488

BISSON PA, BILBY RE, BRYANT MD, DOLLOFF CA, GRETTE GB, HOUSE RA, MURPHY ML, KOSKI KV, SEDELL JR. 1987. Large woody debris in forested streams in the Pacific Northwest: past, present, and future [online] Available from: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US881693588> (Accessed 20 June 2017)

BLACK M. 2013. An investigation into reach scale estimates of sub-pixel fluvial grain size from hyperspatial imagery., Durham University [online] Available from: <http://etheses.dur.ac.uk/6924/> (Accessed 11 December 2014)

BLACK M, CARBONNEAU P, CHURCH M, WARBURTON J. 2014. Mapping sub-pixel fluvial grain sizes with hyperspatial imagery. *Sedimentology* **61** : 691–711. DOI: 10.1111/sed.12072

BLANCKAERT K, HEYMAN J, RENNIE CD. 2017. Measuring Bedload Sediment Transport with an Acoustic Doppler Velocity Profiler. *Journal of Hydraulic Engineering* **143** : 04017008. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001293

BLOTT SJ, PYE K. 2008. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology* **55** : 31–63. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2007.00892.x



BOGEN J, MØEN K. 2003. Bedload measurements with a new passive acoustic sensor. In *Erosion and sediment transport measurement in rivers: technological and methodological advances* , .

BORLAND W. 1960. *Stream channel stability* . United States Bureau of Reclamation: Denver

BOWMAN ET, SOGA K, DRUMMOND TW. 2000. Particle shape characterisation using Fourier analysis . University of Cambridge, Department of Engineering [online] Available from: [https://www.researchgate.net/profile/Elisabeth\\_Bowman/publication/245411238\\_Particle\\_shape\\_characterization\\_using\\_Fourier\\_analysis/links/559e554108aec7200182d3bb.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Elisabeth_Bowman/publication/245411238_Particle_shape_characterization_using_Fourier_analysis/links/559e554108aec7200182d3bb.pdf) (Accessed 5 February 2016)

BRADLEY WC. 1970. Effect of Weathering on Abrasion of Granitic Gravel, Colorado River (Texas). *Geological Society of America Bulletin* **81** : 61. DOI: 10.1130/0016-7606(1970)81[61:EOWOAO]2.0.CO;2

BRADLEY WC, FAHNESTOCK RK, ROWEKAMP ET. 1972. Coarse Sediment Transport by Flood Flows on Knik River, Alaska. *Geological Society of America Bulletin* **83** : 1261. DOI: 10.1130/0016-7606(1972)83[1261:CSTBFF]2.0.CO;2

BRADLEY WC, MEARS AI. 1980. Calculations of Flows Needed to Transport Coarse Fraction of Boulder Creek Alluvium at Boulder, Colorado. *Geological Society of America Bulletin* **91** : 1057–1090. DOI: 10.1130/GSAB-P2-91-1057

BRAVARD J-P, PETIT F. 1997. *Les cours d'eau: dynamique du système fluvial* . Armand Colin. Armand Colin: Paris

BRAY DI, CHURCH M. 1980. Armored versus paved gravel beds. *Journal of Hydraulic Division ASCE* **106** : 1937–1940.

BRCHAN JL, ZHAO L, WU J, WILLIAMS RE, PÉREZ LC. 2012. A real-time RFID localization experiment using propagation models. 141–148 pp. [online] Available from: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6193042](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6193042) (Accessed 4 November 2016)

BREWER PA, LEWIN J. 1993. In-Transport Modification of Alluvial Sediment: Field Evidence and Laboratory Experiments. In *Alluvial Sedimentation* , Marzo M and Puigdefbregas C (eds). Blackwell Publishing Ltd.: Oxford, UK; 23–35. [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781444303995.ch3> (Accessed 13 September 2017)

BRIDGE J, DEMICCO R. 2008. *Earth Surface Processes, Landforms and Sediment Deposits* . Cambridge University Press: Leiden [online] Available from: <http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=377885> (Accessed 5 December 2016)

BRIDGE JS, BENNETT SJ. 1992. A model for the entrainment and transport of sediment grains of mixed sizes, shapes, and densities. *Water Resources Research* **28** : 337–363. DOI: 10.1029/91WR02570

BRIERLEY GJ, HICKIN EJ. 1985. The downstream gradation of particle sizes in the Squamish river, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms* **10** : 597–606. DOI: 10.1002/esp.3290100607

BRIGGS DJ. 1977. *Sediments* . Butterworth-Heinemann Ltd: London ; Boston

- BRUNSDEN D, THORNES JB. 1979. Landscape Sensitivity and Change. *Transactions of the Institute of British Geographers* **4** : 463. DOI: 10.2307/622210
- BUFFINGTON JM. 1996. An alternative method for determining subsurface grain size distributions of gravel-bedded rivers
- BUFFINGTON JM, DIETRICH WE, KIRCHNER JW. 1992. Friction angle measurements on a naturally formed gravel streambed: Implications for critical boundary shear stress. *Water Resources Research* **28** : 411–425. DOI: 10.1029/91WR02529
- BUFFINGTON JM, MONTGOMERY DR. 1999. A Procedure for classifying textural facies in gravel bed rivers. *Water Resources Research* **35** : 1903–1914.
- BUNTE K, APT SR. 2001. Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel- and Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring [online] Available from: [http://www.stream.fs.fed.us/publications/PDFs/rmrs\\_gtr74.pdf](http://www.stream.fs.fed.us/publications/PDFs/rmrs_gtr74.pdf)
- BURBANK DW, LELAND J, FIELDING E, Anderson RS, Brozovic N, Reid MR, Duncan C. 1996. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwestern Himalayas. *Nature* **379** : 505–510. DOI: 10.1038/379505a0
- BURTIN A, CATTIN R, BOLLINGER L, VERGNE J, STEER P, ROBERT A, FINDLING N, TIBERI C. 2011. Towards the hydrologic and bed load monitoring from high-frequency seismic noise in a braided river: The “torrent de St Pierre”, French Alps. *Journal of Hydrology* **408** : 43–53. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.014
- BUSCOMBE D, GRAMS PE, KAPLINSKI MA. 2014a. Characterizing riverbed sediment using high-frequency acoustics: 1. Spectral properties of scattering. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **119** : 2674–2691. DOI: 10.1002/2014JF003189
- BUSCOMBE D, GRAMS PE, KAPLINSKI MA. 2014b. Characterizing riverbed sediment using high-frequency acoustics: 2. Scattering signatures of Colorado River bed sediment in Marble and Grand Canyons. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **119** : 2692–2710. DOI: 10.1002/2014JF003191
- BUSCOMBE D, GRAMS PE, SMITH SM. 2015. Automated riverbed sediment classification using low-cost sidescan sonar. *Journal of Hydraulic Engineering* **142** : 06015019.
- BUSCOMBE D, MASSELINK G, RUBIN DM. 2008. Granular properties from digital images of sediment: Implications for coastal sediment transport modelling. *Coastal Engineering* **10** : 9789814277426\_0135.
- BUSCOMBE D, RUBIN DM. 2012a. Advances in the simulation and automated measurement of well-sorted granular material: 1. Simulation and structure of sediment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **117** : n/a-n/a. DOI: 10.1029/2011JF001974
- BUSCOMBE D, RUBIN DM. 2012b. Advances in the simulation and automated measurement of well-sorted granular material: 2. Direct measures of particle properties. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **117** : n/a-n/a. DOI: 10.1029/2011JF001975

BUSCOMBE D, RUBIN DM, LACY JR, STORLAZZI CD, HATCHER G, CHEZAR H, WYLAND R, SHERWOOD CR. 2014c. Autonomous bed-sediment imaging-systems for revealing temporal variability of grain size: Autonomous bed-sediment imaging systems. *Limnology and Oceanography: Methods* **12** : 390–406. DOI: 10.4319/lom.2014.12.390

BUSCOMBE D, RUBIN DM, WARRICK JA. 2010. A universal approximation of grain size from images of noncohesive sediment. *Journal of Geophysical Research* **115** DOI: 10.1029/2009JF001477 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2009JF001477> (Accessed 11 December 2014)

BUSKAMP R. 1994. The influence of channel steps on coarse bed load transport in mountain torrents: case study using the radio tracer technique 'PESY.' In *Dynamics and geomorphology of mountain rivers* , . Springer; 129–139. [online] Available from: <http://link.springer.com/chapter/10.1007/BFb0117836> (Accessed 15 February 2016)

CAILLEUX A. 1947. L'indice d'émoussé: définition et première application. *Compte Rendu des Sommaires de la Societe Geologique de France*

CAMENEN B, LE COZ J, PAQUIER A, LAGOUY M, others. 2010. An estimation of gravel mobility over an alpine river gravel bar (Arc en Maurienne, France) using PIT-tag tracers [online] Available from: <http://hal.inria.fr/hal-00546908/> (Accessed 11 December 2014)

CAPANNI R. 2011. Étude et gestion intégrée des transferts sédimentaires dans le système Gapeau/rade d'Hyères . Aix-Marseille 1 [online] Available from: <http://www.theses.fr/2011AIX10187> (Accessed 22 August 2017)

CARBONNEAU PE. 2005. The threshold effect of image resolution on image-based automated grain size mapping in fluvial environments. *Earth Surface Processes and Landforms* **30** : 1687–1693. DOI: 10.1002/esp.1288

CARBONNEAU PE, BERGERON N, LANE SN. 2005. Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes: SIZE MEASUREMENTS OF FLUVIAL GRAIN SIZES. *Water Resources Research* **41** : n/a-n/a. DOI: 10.1029/2005WR003994

CARBONNEAU PE, DUGDALE SJ, CLOUGH S. 2009. An automated georeferencing tool for watershed scale fluvial remote sensing. *River Research and Applications* : n/a-n/a. DOI: 10.1002/rra.1263

CARBONNEAU PE, LANE SN, BERGERON NE. 2003. Cost-effective non-metric close-range digital photogrammetry and its application to a study of coarse gravel river beds. *International Journal of Remote Sensing* **24** : 2837–2854. DOI: 10.1080/01431160110108364

CARBONNEAU PE, LANE SN, BERGERON NE. 2004. Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery: MAPPING GRAIN SIZE IN GRAVEL BED RIVERS. *Water Resources Research* **40** : n/a-n/a. DOI: 10.1029/2003WR002759

CARBONNEAU PE, PIÉGAY H. 2012a. 1 Introduction: The Growing Use of Imagery in Fundamental and Applied River Sciences. In *Fluvial Remote Sensing for Science and Management* , .

CARBONNEAU PE, PIÉGAY H. 2012b. 19 Future Prospects and Challenges for River Scientists and Managers. In *Fluvial Remote Sensing for Science and Management* , . 431.

CARBONNEAU PE, PIÉGAY H, LEJOT J, DUNFORD R, MICHEL K. 2012. Hyperspatial Imagery in Riverine Environments. In *Fluvial Remote Sensing for Science and Management* , Carbonneau PE and Piégay H (eds). John Wiley & Sons, Ltd: Chichester, UK; 163–191. [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781119940791.ch8> (Accessed 16 November 2016)

CARLING PA. 1983. Threshold of coarse sediment transport in broad and narrow natural streams. *Earth Surface Processes and Landforms* **8** : 1–18. DOI: 10.1002/esp.3290080102

CARLING PA, KELSEY A, GLAISTER MS. 1992. Effect of bed roughness, particle shape and orientation on initial motion criteria. In *Dynamics of Gravel-bed Rivers* , . Hey, R.D. Billi, P., Thorne, C.R. and Tacconi, P. (eds): Chichester; 24–39. [online] Available from: [https://www.researchgate.net/publication/260020726\\_Effect\\_of\\_bed\\_roughness\\_particle\\_shape\\_and\\_orientation\\_on\\_initial\\_motion\\_criteria](https://www.researchgate.net/publication/260020726_Effect_of_bed_roughness_particle_shape_and_orientation_on_initial_motion_criteria) (Accessed 26 September 2016)

CARRÉ DM, BIRON PM, GASKIN SJ. 2007. Flow dynamics and bedload sediment transport around paired deflectors for fish habitat enhancement: a field study in the Nicolet River. *Canadian Journal of Civil Engineering* **34** : 761–769. DOI: 10.1139/106-083

CASSEL M, PIÉGAY H, LAVÉ J. 2016. Effects of transport and insertion of radio frequency identification (RFID) transponders on resistance and shape of natural and synthetic pebbles: applications for riverine and coastal bedload tracking: Transport and Rfid-Insertion Effects on the Fragility of Pebbles. *Earth Surface Processes and Landforms* DOI: 10.1002/esp.3989 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/esp.3989> (Accessed 4 August 2016)

CHACHO EF, EMMETT WW, BURROWS RL. 1994. Monitoring Gravel Movement Using Radio Transmitters. presented at the Hydraulic Engineering. 785–789 pp. [online] Available from: <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0089499> (Accessed 13 September 2017)

CHAPUIS M. 2012. Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés: éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance, Aix-Marseille [online] Available from: <http://www.theses.fr/2012AIXM3019> (Accessed 11 December 2014)

CHAPUIS M, BRIGHT CJ, HUFNAGEL J, MACVICAR B. 2014. Detection ranges and uncertainty of passive Radio Frequency Identification (RFID) transponders for sediment tracking in gravel rivers and coastal environments. *Earth Surface Processes and Landforms* **39** : 2109–2120. DOI: 10.1002/esp.3620

CHAPUIS M, DUFOUR S, PROVANSAL M, COUVERT B, de Linares M. 2015. Coupling channel evolution monitoring and RFID tracking in a large, wandering, gravel-bed river: Insights into sediment routing on geomorphic continuity through a riffle–pool sequence. *Geomorphology* **231** : 258–269. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.12.013

CHE X, WELLS I, DICKERS G, KEAR P, GONG X. 2011. Re-Evaluation of RF Electromagnetic Communication in Underwater Sensor Networks. *Communications Magazine, IEEE* **48** : 143–151. DOI: 10.1109/MCOM.2010.5673085

CHEN B, STEPHENSON W. 2015. Measuring pebble abrasion on a mixed sand and gravel beach using abrasion baskets. *Geomorphology* **248** : 24–32. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.07.034

- CHENG ED., CLYDE CG. 1972. Instantaneous hydrodynamic lift and drag forces on large roughness elements in turbulent open channel flow. presented at the Sedimentation - Symposium to Honor Professor H.A. Einstein. Fort Collins. 3-1-3–20 pp.
- CHOI JS, LEE H, ELMASRI R, ENGELS DW. 2009. Localization Systems Using Passive UHF RFID. 1727–1732 pp. [online] Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5331332/> (Accessed 3 November 2016)
- CHURCH M. 2002. Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshwater Biology* **47** : 541–557. DOI: 10.1046/j.1365-2427.2002.00919.x
- CHURCH M. 2006. Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **34** : 325–354.
- CHURCH M, HASSAN MA. 1992. Size and Distance of Travel of Unconstrained Clasts on a Streambed. *Water Resources Research* **28** : 299–303.
- CHURCH M, MCCLEAN DG, WOLCOTT JF. 1987. River bed gravels: sampling and analysis. In *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers* , Thorne CR, Bathurst JC, and Hey RD (eds). Chichester; 43–88.
- CHURCH MA. 1972. Baffin Island sandurs: A study of arctic fluvial processes, . Dept. of Energy, Mines and Resources
- CONSTANTINE JA, DUNNE T, AHMED J, LEGLEITER C, LAZARUS ED. 2014. Sediment supply as a driver of river meandering and floodplain evolution in the Amazon Basin. *Nature Geoscience* **7** : 899–903. DOI: 10.1038/ngeo2282
- COREY AT. 1949. Influence of Shape on Fall Velocity of Sand Grains., Unpublished MS, Colorado A&M College: Colorado
- COTTET M. 2006. Mesure et structures spatiales et temporelles de l'éroulé des galets dans le réseau hydrographique du Bez
- COX EP. 1927. A method of assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains. *Journal of Paleontology* **1** : 179–183.
- CROFTS RS. 1974. A Visual Measure of Shingle Particle Form for Use in the Field. *SEPM Journal of Sedimentary Research* **Vol. 44** DOI: 10.1306/212F6BEA-2B24-11D7-8648000102C1865D [online] Available from: <http://jsedres.sepmonline.org/cgi/doi/10.1306/212F6BEA-2B24-11D7-8648000102C1865D> (Accessed 3 January 2017)
- DATRY T, DOLE-OLIVIER M-J, MARMONIER P, CLARET C, PERRIN J-F, LAFONT M, BREIL P, others. 2008. La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *Ingénieries-EAT* [online] Available from: <http://hal.inria.fr/hal-00602672/> (Accessed 11 December 2014)
- DAWSON M. 1988. Sediment size variation in a braided reach of the Sunwapta River, Alberta, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms* **13** : 599–618. DOI: 10.1002/esp.3290130705

- DELL'AGNESE A, BRARDINONI F, TORO M, MAO L, ENGEL M, COMITI F. 2015. Bedload transport in a formerly glaciated mountain catchment constrained by particle tracking. *Earth Surface Dynamics* **3** : 527–542. DOI: 10.5194/esurf-3-527-2015
- DEMIR T. 2000. The influence of particle shape on bedload transport in coarse-bed river channels, Durham University [online] Available from: <http://etheses.dur.ac.uk/4375/> (Accessed 11 December 2014)
- DEMIR T, WALSH RPD. 2005. Shape and size characteristics of bedload transported during winter storm events in the Cwm Trewern Stream, Brecon Beacons, South Wales. *Turkish Journal of Earth Sciences* **14** : 105–121.
- DEPRET T. 2014. Fonctionnement morphodynamique actuel et historique des méandres du Cher. <http://www.theses.fr> [online] Available from: <http://www.theses.fr/s90847> (Accessed 30 March 2016)
- DIEPENBROEK M, BARTHOLOMÄ A, IBBEKEN H. 1992. How round is round? A new approach to the topic 'roundness' by Fourier grain shape analysis. *Sedimentology* **39** : 411–422.
- DOBKINS JEJ, FOLK RL. 1970. Shape development on Tahiti-nui. *Journal of Sedimentary Petrology* **35** : 381–390.
- DOMOKOS G, GIBBONS GW. 2012. The evolution of pebble size and shape in space and time. *Proc. R. Soc. A* **468** : 3059–3079. DOI: 10.1098/rspa.2011.0562
- DOMOKOS G, GIBBONS GW. 2013. Geometrical and physical models of abrasion. arXiv preprint arXiv:1307.5633 [online] Available from: <http://arxiv.org/abs/1307.5633> (Accessed 18 March 2016)
- DOMOKOS G, JEROLMACK DJ, SIPOS AÁ, TÖRÖK Á. 2014. How river rocks round: resolving the shape-size paradox. *PloS one* **9** : e88657.
- DOMOKOS G, KUN F, SIPOS AÁ, SZABÓ T. 2015. Universality of fragment shapes. *Scientific Reports* **5** DOI: 10.1038/srep09147 [online] Available from: <http://www.nature.com/articles/srep09147> (Accessed 13 September 2017)
- DOMOKOS G, SIPOS A, SZABÓ T, VÁRKONYI P. 2009. Pebbles, Shapes, and Equilibria. *Mathematical Geosciences* **42** : 29–47. DOI: 10.1007/s11004-009-9250-4
- DORAVA JM, MONTGOMERY DR, PALCSAK BB, FITZPATRICK FA (eds). 2001. *Geomorphic Processes and Riverine Habitat*. American Geophysical Union: Washington, D. C. [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/WS004> (Accessed 18 September 2017)
- DOWDESWELL JA. 1982. Scanning Electron Micrographs of Quartz Sand Grains from Cold Environments Examined Using Fourier Shape Analysis. *Journal of Sedimentary Research* **52** [online] Available from: <http://archives.datapages.com/data/sepjournals/v51-54/data/052/052004/1315.htm> (Accessed 30 March 2016)
- DREVIN GR. 2007. Computational Methods for the Determination of Roundness of Sedimentary Particles. *Mathematical Geology* **38** : 871–890. DOI: 10.1007/s11004-006-9051-y

- DREVIN GR, VINCENT L. 2002. Granulometric determination of sedimentary rock particle roundness. Proceedings of ISMM2002
- DUFOUR S. 2005. Contrôles naturels et anthropiques de la structure et de la dynamique des forêts riveraines des cours d'eau du bassin rhodanien (Ain, Arve, Drôme et Rhône), phdthesis, Université Jean Moulin - Lyon III, 28 November [online] Available from: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00012155/document> (Accessed 15 June 2017)
- DUNN EJ. 1911. Pebbles . Melbourne, Robertson [online] Available from: <http://archive.org/details/pebblesej00dunnuoft> (Accessed 30 March 2016)
- DURIAN DJ, BIDEAUD H, DURINGER P, SCHRODER A, MARQUES CM. 2008. The shape and erosion of pebbles. arXiv preprint cond-mat/0607122 [online] Available from: <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0607122> (Accessed 5 February 2015)
- DURIAN DJ, BIDEAUD H, DURINGER P, SCHRÖDER A, THALMANN F, MARQUES CM. 2006. What Is in a Pebble Shape? Physical Review Letters **97** DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.028001 [online] Available from: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.97.028001> (Accessed 28 June 2017)
- EHRlich R, WEINBERG B. 1970. An exact method for characterization of grain shape. Journal of Sedimentary Research **40** : 205–212. DOI: 10.1306/74D71F1E-2B21-11D7-8648000102C1865D
- EINSTEIN AH. 1937. Bedload transport as a probability problem, Colorado State University
- EINSTEIN HA, EL-SAMNI E-SA. 1949. Hydrodynamic Forces on a Rough Wall. Reviews of Modern Physics **21** : 520–524. DOI: 10.1103/RevModPhys.21.520
- ENGELUND F, HANSEN E. 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. Technical University of Denmark Ostervoldgade 10, Copenhagen K. [online] Available from: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:81101b08-04b5-4082-9121-861949c336c9?collection=research> (Accessed 13 September 2017)
- ERGENZINGER P, DE JONG C, BOGEN J, FERGUS T, WALLING DE. 2003. Bed Load Monitoring and Transport Processes. In Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances (Proceedings of the Oslo Workshop. June 2002). IAHS Publication 283, 2003. , . 113–125.
- ERGENZINGER P, SCHMIDT KH. 1990. Stochastic elements of bed load transport in a step-pool mountain river. Hydrology in mountainous regions. II—Artificial reservoirs, water and slopes: International Association of Hydrological Sciences Publication **194** : 39–46.
- FERGUSON R, HOEY T, WATHEN S, WERRITTY A. 1996. Field evidence for rapid downstream fining of river gravels through selective transport. Geology **24** : 179. DOI: 10.1130/0091-7613(1996)024<0179:FEFRDF>2.3.CO;2
- FERGUSON RI, BLOOMER DJ, HOEY TB, WERRITTY A. 2002a. Mobility of river tracer pebbles over different timescales. Water Resources Research **38** : 3-1-3–8. DOI: 10.1029/2001WR000254

- FERGUSON RI, HOEY TB, BLOOMER DJ, WERRITTY A. 2002b. Long-term slowdown of river tracer pebbles: Generic models and implications for interpreting short-term tracer studies. *Water Resources Research* **38** : 17-1-17–11. DOI: 10.1029/2001WR000637
- FERGUSON RI, SHARMA BP, HODGE RA, HARDY RJ, WARBURTON J. 2017. Bed load tracer mobility in a mixed bedrock/alluvial channel: Tracer-Pebble Mobility Over Bedrock. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **122** : 807–822. DOI: 10.1002/2016JF003946
- FERGUSON RI, WATHEN SJ. 1998. Tracer-pebble movement along a concave river profile: Virtual velocity in relation to grain size and shear stress. *Water Resources Research* **34** : 2031–2038. DOI: 10.1029/98WR01283
- FOLK RL. 1955. Student operator error in determination of roundness, sphericity, and grain size. *Journal of Sedimentary Research* **25** : 297–301. DOI: 10.1306/74D70493-2B21-11D7-8648000102C1865D
- FOLK RL. 1980. *Petrology of sedimentary rocks* . Hemphill Publishing Company [online] Available from: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/22930/folkpetrology.pdf?sequence=3> (Accessed 21 June 2017)
- FORT M, BÉTARD F, ARNAUD-FASSETTA G. 2015. *Géomorphologie dynamique et environnement* . Armand Colin: Paris
- FOSTER IDL, Meeting BGRGG. 2000. *Tracers in geomorphology* . John Wiley
- FRANCALANCI S, PARIS E, SOLARI L. 2013. A combined field sampling-modeling approach for computing sediment transport during flash floods in a gravel-bed stream: Sediment Transport During Flash Floods. *Water Resources Research* **49** : 6642–6655. DOI: 10.1002/wrcr.20544
- FRINGS RM. 2008. Downstream fining in large sand-bed rivers. *Earth-Science Reviews* **87** : 39–60. DOI: 10.1016/j.earscirev.2007.10.001
- FRISSELL CA, LISS WJ, WARREN CE, Hurley MD. 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental management* **10** : 199–214.
- GEAY T. 2013. *Mesure acoustique passive du transport par charriage dans les rivières, Grenoble, 4 December* [online] Available from: <http://www.theses.fr/2013GRENU052> (Accessed 13 September 2017)
- GILBERT GK. 1877. *Report on the geology of the Henry Mountains* . USGS Unnumbered Series. U.S. Government Printing Office: Washington, D.C. [online] Available from: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70039916> (Accessed 13 September 2017)
- GOMEZ B. 1984. Typology of segregated (armoured/paved) surfaces: Some comments. *Earth Surface Processes and Landforms* **9** : 19–24. DOI: 10.1002/esp.3290090103
- GOMEZ B. 1994. Effects of particle shape and mobility on stable armor development. *Water Resources Research* **30** : 2229–2239. DOI: 10.1029/94WR00770



GORDON ND, MCMAHON TA, FINLAYSON BL. 1992. Stream hydrology: an introduction for ecologies . John Wiley: New York

GRAHAM DJ, MIDGLEY NG. 2000a. Graphical representation of particle shape using triangular diagrams: an Excel spreadsheet method. *Earth Surface Processes and Landforms* **25** : 1473–1477. DOI: 10.1002/1096-9837(200012)25:13<1473::AID-ESP158>3.0.CO;2-C

GRAHAM DJ, MIDGLEY NG. 2000b. TECHNICAL COMMUNICATION-Graphical Representation of Particle Shape using Triangular Diagrams: An Excel Spreadsheet Method. *Earth Surface Processes and Landforms* **25** : 1473–1478.

GRAHAM DJ, REID I, RICE SP. 2005a. Automated sizing of coarse-grained sediments: image-processing procedures. *Mathematical Geology* **37** : 1–28.

GRAHAM DJ, RICE SP, REID I. 2005b. A transferable method for the automated grain sizing of river gravels. *Water Resources Research* **41** [online] Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004WR003868/full> (Accessed 11 December 2014)

GRAHAM DJ, RICE SP, REID I. 2005c. Comment: Photographic techniques for characterizing streambed particle sizes. *Transactions of the American Fisheries Society* **134** : 1599–1603.

GRAHAM DJ, ROLLET A-J, PIÉGAY H, RICE SP. 2010. Maximizing the accuracy of image-based surface sediment sampling techniques: IMAGE-BASED SURFACE SEDIMENT SAMPLING. *Water Resources Research* **46** : n/a-n/a. DOI: 10.1029/2008WR006940

GRAHAM DJ, ROLLET A-J, RICE SP, PIÉGAY H. 2012. Conversions of Surface Grain-Size Samples Collected and Recorded Using Different Procedures. *Journal of Hydraulic Engineering* **138** : 839–849. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000595

GRAY JR, LARONNE JB, MARR JDG. 2010. Bedload-surrogate monitoring technologies . USGS Numbered Series. U.S. Geological Survey [online] Available from: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/sir20105091> (Accessed 13 September 2017)

GROAT BF. 1920. Ice diversion for St. Lawrence River Power Company. *Canadian Engineer* **39** : 545–552.

HABERSACK H, KREISLER A, RINDLER R, AIGNER J, SEITZ H, LIEDERMANN M, LARONNE JB. 2016. Integrated automatic and continuous bedload monitoring in gravel bed rivers. *Geomorphology* DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.10.020 [online] Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X1630976X> (Accessed 28 October 2016)

HABERSACK H, SEITZ H, LIEDERMANN M. 2010. Integrated automatic bedload transport monitoring. US Geological Survey Scientific Investigations Report **5091** : 218–235.

HABERSACK HM. 2001. Radio-tracking gravel particles in a large braided river in New Zealand: A field test of the stochastic theory of bed load transport proposed by Einstein. *Hydrological Processes* **15** : 377–391.

HASCHENBURGER JK, CHURCH M. 1998. Bed material transport estimated from the virtual velocity of sediment. *Earth Surface Processes and Landforms* **23** : 791–808. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199809)23:9<791::AID-ESP888>3.0.CO;2-X

HASSAN MA, CHURCH M, SCHICK AP. 1991. Distance of movement of coarse particles in gravel bed streams. *Water Resources Research* **27** : 503–511. DOI: 10.1029/90WR02762

HASSAN MA, ERGENZINGER P. 2003. Use of tracers in fluvial geomorphology. In *Tools in Fluvial Geomorphology*, . Kondolf and Piégay: Hoboken, NJ, USA; 397–423.

HASSAN MA, ROY AG. 2016. Coarse particle tracing in fluvial geomorphology. In *Tools in Fluvial Geomorphology*, KONDOLF GM and PIÉGAY H (eds). John Wiley & Sons, Ltd; 306–323. [online] Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118648551.ch14/summary> (Accessed 2 November 2016)

HASSAN MA, VOEPEL H, SCHUMER R, PARKER G, FRACCAROLLO L. 2013. Displacement characteristics of coarse fluvial bed sediment: DISPLACEMENT OF COARSE FLUVIAL SEDIMENT. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **118** : 155–165. DOI: 10.1029/2012JF002374

HATTINGH J, ILLENBERGER WK. 1995. Shape sorting of flood-transported synthetic clasts in a gravel bed river. *Sedimentary Geology* **96** : 181–190. DOI: 10.1016/0037-0738(94)00139-L

HAYAKAWA Y, OGUCHI T. 2005. Evaluation of gravel sphericity and roundness based on surface-area measurement with a laser scanner. *Computers & Geosciences* **31** : 735–741. DOI: 10.1016/j.cageo.2005.01.004

HEY RD, THORNE CR. 1983. Accuracy of Surface Samples from Gravel Bed Material. *Journal of Hydraulic Engineering* **109** : 842–851. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:6(842)

HJULSTRÖM F. 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Inaugural dissertation, Almqvist & Wiksells: Uppsala

HOEY T. 1992. Temporal variations in bedload transport rates and sediment storage in gravel-bed rivers. *Progress in Physical Geography* **16** : 319–338. DOI: 10.1177/030913339201600303

HOEY TB, FERGUSON RI. 1997. Controls of strength and rate of downstream fining above a river base level. *Water Resources Research* **33** : 2601–2608. DOI: 10.1029/97WR02324

HOUBRECHTS G, LEVECQ Y, PEETERS A, HALLOT E, VAN CAMPENHOUT J, DENIS A-C, PETIT F. 2015. Evaluation of long-term bedload virtual velocity in gravel-bed rivers (Ardenne, Belgium). *Geomorphology* **251** : 6–19. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.05.012

HOUBRECHTS G, LEVECQ Y, VANDERHEYDEN V, PETIT F. 2011. Long-term bedload mobility in gravel-bed rivers using iron slag as a tracer. *Geomorphology* **126** : 233–244. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.11.006

HOUBRECHTS G, PETIT F. 2003. Utilisation des scories métallurgiques en dynamique fluviale : détermination de la compétence effective des rivières et estimation des vitesses de progression de leur charge de fond / Utilisation of métallurgie slags for the study of fluvial dynamics: determination of the effective competency of rivers and estimation of the transit time of sedimentary waves. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* **9** : 3–12. DOI: 10.3406/morfo.2003.1162

- HOUBRECHTS G, VAN CAMPENHOUT J, LEVECQ Y, HALLOT E, PEETERS A, PETIT F. 2012. Comparison of methods for quantifying active layer dynamics and bedload discharge in armoured gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* **37** : 1501–1517. DOI: 10.1002/esp.3258
- IBBEKEN H, SCHLEYER R. 1986. Photo-sieving: A method for grain-size analysis of coarse-grained, unconsolidated bedding surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms* **11** : 59–77.
- ILLENBERGER WK. 1991. Pebble Shape (and Size!). *SEPM Journal of Sedimentary Research* **Vol. 61** DOI: 10.1306/D42677C6-2B26-11D7-8648000102C1865D [online] Available from: <http://jsedres.sepmonline.org/cgi/doi/10.1306/D42677C6-2B26-11D7-8648000102C1865D> (Accessed 22 June 2017)
- ILLENBERGER WK, REDDERING JSV. 1993. An evaluation of shape indices as palaeoenvironmental indicators using quartzite and metavolcanic clasts in Upper Cretaceous to Palaeogene beach, river and submarine fan conglomerates. *Sedimentology* **40** : 1019–1020. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1993.tb01373.x
- IMHOFF KS, WILCOX AC. 2016. Coarse bedload routing and dispersion through tributary confluences. *Earth Surface Dynamics* **4** : 591–605. DOI: 10.5194/esurf-4-591-2016
- ISBASH S. 1936. Construction of Dams by Depositing Rock in Running Water . International Congress on Large Dams
- JANKE NC. 1966. Effect of Shape Upon the Settling Velocity of Regular Convex Geometric Particles. *Journal of Sedimentary Research* **36** [online] Available from: <http://archives.datapages.com/data/sepm/journals/v33-37/data/036/036002/0370.htm> (Accessed 23 March 2016)
- JANOO V. 1998. Quantification of shape, angularity, and surface texture of base course materials . COLD REGIONS RESEARCH AND ENGINEERING LAB HANOVER NH [online] Available from: <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA335673> (Accessed 27 June 2017)
- JEROLMACK DJ, REITZ MD, MARTIN RL. 2011. Sorting out abrasion in a gypsum dune field. *Journal of Geophysical Research* **116** DOI: 10.1029/2010JF001821 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2010JF001821> (Accessed 25 August 2017)
- JOHO D, PLAGEMANN C, BURGARD W. 2009. Modeling RFID signal strength and tag detection for localization and mapping. 3160–3165 pp. [online] Available from: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5152372](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5152372) (Accessed 3 November 2016)
- JONES LS, HUMPHREY NF. 1997. Weathering-controlled abrasion in a coarse-grained, meandering reach of the Rio Grande: Implications for the rock record. *Geological Society of America Bulletin* **109** : 1080–1088.
- KELLER EA. 1970. Bed-load movement experiments; Dry Creek, California. *Journal of Sedimentary Research* **40** : 1339–1344. DOI: 10.1306/74D7219E-2B21-11D7-8648000102C1865D
- KELLERHALS R, BRAY DI. 1971. Sampling Procedures for Coarse Fluvial Sediments. *Journal of the Hydraulics Division* **97** : 1165–1180.

- KIRCHNER JW, DIETRICH WE, ISEYA F, IKEDA H. 1990. The variability of critical shear stress, friction angle, and grain protrusion in water-worked sediments. *Sedimentology* **37** : 647–672.
- KLEINHANS MG. 2010. Sorting out river channel patterns. *Progress in Physical Geography* **34** : 287–326. DOI: 10.1177/0309133310365300
- KLOESCH M, TRITTHART M, LIEDERMANN M, HABERSACK H. 2008. Sediment input and selfinitiated riverbank erosion to mitigate channel incision: methods for monitoring the effectiveness of a new management technique. 505–512 pp. [online] Available from: [http://www.riverfoundation.org.au/admin/multipart\\_forms/mpf\\_\\_resource\\_309\\_8\\_\\_\\_Reference\\_06\\_DRAMURCI\\_Gosdorf\\_SedimentTransport\\_ECRR.pdf](http://www.riverfoundation.org.au/admin/multipart_forms/mpf__resource_309_8___Reference_06_DRAMURCI_Gosdorf_SedimentTransport_ECRR.pdf) (Accessed 5 May 2015)
- KNIGHTON AD. 1982. Longitudinal changes in the size and shape of stream bed material: evidence of variable transport conditions. *Catena* **9** : 25–34.
- KNIGHTON D. 1984. *Fluvial forms and processes* . Edward Arnold: London
- KNIGHTON D. 1998. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective* . Arnold
- KO C-H. 2010. RFID 3D location sensing algorithms. *Automation in Construction* **19** : 588–595. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.02.003
- KODAMA Y. 1994a. Downstream Changes in the Lithology and Grain Size of Fluvial Gravels, the Watarase River, Japan: Evidence of the Role of Abrasion in Downstream Fining. *SEPM Journal of Sedimentary Research* **Vol. 64A** DOI: 10.1306/D4267D0C-2B26-11D7-8648000102C1865D [online] Available from: <http://jsedres.sepmonline.org/cgi/doi/10.1306/D4267D0C-2B26-11D7-8648000102C1865D> (Accessed 13 September 2017)
- KODAMA Y. 1994b. Experimental study of abrasion and its role in producing downstream fining in gravel-bed rivers. *Journal of Sedimentary Research* **64** : 76–85. DOI: 10.2110/jsr.64.76
- KOMAR PD. 1987. Selective gravel entrainment and the empirical evaluation of flow competence. *Sedimentology* **34** : 1165–1176. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1987.tb00599.x
- KOMAR PD, Li Z. 1986. Pivoting analyses of the selective entrainment of sediments by shape and size with application to gravel threshold. *Sedimentology* **33** : 425–436.
- KOMAR PD, Li Z. 1988. Applications of grain-pivoting and sliding analyses to selective entrapment of gravel and to flow-competence evaluations. *Sedimentology* **35** : 681–695. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1988.tb01244.x
- KONDOLF GM, MATTHEWS WVG. 1986. Transport of tracer gravels on a coastal California river. *Journal of Hydrology* **85** : 265–280. DOI: 10.1016/0022-1694(86)90060-0
- KONDOLF GM, PIÉGAY H (eds). 2003. *Tools in fluvial geomorphology* . J. Wiley: Hoboken, NJ, USA
- KRAPIVSKY PL, REDNER S. 2007. Smoothing a rock by chipping. *Physical Review E* **75** DOI: 10.1103/PhysRevE.75.031119 [online] Available from: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.75.031119> (Accessed 13 September 2017)

- KRINSLEY D, DONAHUE J. 1968. Methods to Study Surface Textures of Sand Grains, a Discussion. *Sedimentology* **10** : 217–221. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1968.tb01114.x
- KRUMBEIN WC. 1934. Size Frequency Distributions of Sediments. *SEPM Journal of Sedimentary Research* **Vol. 4** DOI: 10.1306/D4268EB9-2B26-11D7-8648000102C1865D [online] Available from: <http://jsedres.sepmonline.org/cgi/doi/10.1306/D4268EB9-2B26-11D7-8648000102C1865D> (Accessed 12 September 2017)
- KRUMBEIN WC. 1941a. Measurement and Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles. *SEPM Journal of Sedimentary Research* **Vol. 11** DOI: 10.1306/D42690F3-2B26-11D7-8648000102C1865D [online] Available from: <http://jsedres.sepmonline.org/cgi/doi/10.1306/D42690F3-2B26-11D7-8648000102C1865D> (Accessed 29 November 2016)
- KRUMBEIN WC. 1941b. The Effects of Abrasion on the Size, Shape and Roundness of Rock Fragments. *The Journal of Geology* **49** : 482–520.
- KRUMBEIN WC. 1942. Settling-velocity and flume-behavior of non-spherical particles. *Eos, Transactions American Geophysical Union* **23** : 621–633.
- KRUMBEIN WC and P FJ, Pettijohn FJ. 1938. *Manual of Sedimentary Petrography* . Earth Science Series. Appleton-Century-Crofts, Inc., New York
- KRUMBEIN WC, Sloss LL. 1951. *Stratigraphy and Sedimentation* . W. H. Freeman and Company: San Francisco [online] Available from: <https://www.biblio.com/book/stratigraphy-sedimentation-krumbein-wc-ll-sloss/d/46985757> (Accessed 26 July 2017)
- KRYNINE PD. 1960. On the Antiquity of “sedimentation” and Hydrology (with Some Moral Conclusions). *Geological Society of America Bulletin* **71** : 1721–1726. DOI: 10.1130/0016-7606(1960)71[1721:OTAOSA]2.0.CO;2
- KUENEN PH. 1955. Experimental abrasion of pebbles I. Wet sandblasting. *Leidse Geologische Mededelingen* **20** : 142–150.
- KUENEN PH. 1956. Experimental Abrasion of Pebbles: 2. Rolling by Current. *The Journal of Geology* **64** : 336–368.
- LALLIAS-TACON S, LIÉBAULT F, PIÉGAY H. 2014. Step by step error assessment in braided river sediment budget using airborne LiDAR data. *Geomorphology* **214** : 307–323. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.02.014
- LAMARRE H, MACVICAR B, ROY AG. 2005. Using Passive Integrated Transponder (PIT) Tags to Investigate Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers. *Journal of Sedimentary Research* **75** : 736–741. DOI: 10.2110/jsr.2005.059
- LAMARRE H, ROY AG. 2008a. A field experiment on the development of sedimentary structures in a gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms* **33** : 1064–1081. DOI: 10.1002/esp.1602
- LAMARRE H, ROY AG. 2008b. The role of morphology on the displacement of particles in a step–pool river system. *Geomorphology* **99** : 270–279. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.11.005

- LAMB MP, DIETRICH WE, VENDITTI JG. 2008. Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope? *Journal of Geophysical Research* **113** DOI: 10.1029/2007JF000831 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2007JF000831> (Accessed 13 September 2017)
- LANE EW. 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proceedings (American Society of Civil Engineers)*; v. 81, paper no. 745 [online] Available from: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201400000288> (Accessed 26 July 2017)
- LANE EW, CARLSON EJ. 1954. Some observations on the effect of particle shape on the movement of coarse sediments. *Eos, Transactions American Geophysical Union* **35** : 453–462. DOI: 10.1029/TR035i003p00453
- LARONNE JB, ALEXANDROV Y, BERGMAN N, COHEN H, GARCIA C, HABERSACK H, POWELL DM, REID I. 2003. The continuous monitoring of bed load flux in various fluvial environments. *IAHS PUBLICATION* : 134–145.
- LARONNE JB, CARSON MA. 1976. Interrelationships between bed morphology and bed-material transport for a small, gravel-bed channel\*. *Sedimentology* **23** : 67–85. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1976.tb00039.x
- LAUTH TJ, PAPANICOLAOU AN. 2008. Experimental/feasibility study of radio frequency tracers for monitoring sediment transport and scour around bridges. 12–16 pp. [online] Available from: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40976\(316\)345](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40976(316)345) (Accessed 27 October 2016)
- LAUTH TJ, PAPANICOLAOU AN. 2009. Application of radio frequency tracers to individual and group particle displacement within a laboratory [online] Available from: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41036\(342\)225](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41036(342)225) (Accessed 27 October 2016)
- LEES G. 1964a. A New Method for Determining the Angularity of Particles. *Sedimentology* **3** : 2–21. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1964.tb00271.x
- LEES G. 1964b. The Measurement of Particle Shape and Its Influence in Engineering Materials . *British Granite and Whinstone Federation*
- LEJOT J, PIÉGAY H, HUNTER PD, MOULIN B, GAGNAGE M. 2011. Utilisation de la télédétection pour la caractérisation des corridors fluviaux: exemples d'applications et enjeux actuels. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* **17** : 157–172. DOI: 10.4000/geomorphologie.9362
- LENZI MA. 2004. Displacement and transport of marked pebbles, cobbles and boulders during floods in a steep mountain stream. *Hydrological Processes* **18** : 1899–1914. DOI: 10.1002/hyp.1456
- LEOPOLD LB, EMMETT WW, MYRICK RM. 1966. Channel and hillslope processes in a semiarid area, New Mexico . Report [online] Available from: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp352G>

- LEOPOLD LB, WOLMAN MG. 1957. River channel patterns: Braided, meandering, and straight . U.S. Government Printing Office [online] Available from: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp282B> (Accessed 14 June 2017)
- LI Z, KOMAR PD. 1986. Laboratory measurements of pivoting angles for applications to selective entrainment of gravel in a current. *Sedimentology* **33** : 413–423. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1986.tb00545.x
- LIÉBAULT F. 2003. Les rivières torrentielles des montagnes drômoises: évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies), l'Université Lumière Lyon 2: Lyon, France
- LIÉBAULT F, BELLOT H, CHAPUIS M, KLOTZ S, DESCHÂTRES M. 2012. Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream: bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream. *Earth Surface Processes and Landforms* **37** : 385–399. DOI: 10.1002/esp.2245
- LIÉBAULT F, CHAPUIS M, BELLOT H, DESCHATRES M. 2009. A radio frequency tracing experiment of bedload transport in a small braided mountain stream. presented at the EGU General Assembly Conference Abstracts. 1327 pp. April [online] Available from: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009EGUGA..11.1327L> (Accessed 22 August 2017)
- LIÉBAULT F, GOMEZ B, PAGE M, MARDEN M, PEACOCK D, RICHARD D, TROTTER CM. 2005. Land-use change, sediment production and channel response in upland regions. *River Research and Applications* **21** : 739–756. DOI: 10.1002/tra.880
- LIÉBAULT F, LALLIAS-TACON S, CASSEL M, TALASKA N. 2013. Long profile responses of alpine braided rivers in SE France. *River Research and Applications* **29** : 1253–1266. DOI: 10.1002/rra.2615
- LIÉBAULT F, LARONNE JB. 2008. Evaluation of bedload yield in gravel-bed rivers using scour chains and painted tracers: the case of the Esconavette Torrent (Southern French Prealps). *Geodinamica Acta* **21** : 23–34. DOI: 10.3166/ga.21.23-34
- LIÉBAULT F, PIÉGAY H. 2002. Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms* **27** : 425–444. DOI: 10.1002/esp.328
- LIEDERMANN M, TRITTHART M, HABERSACK H. 2013. Particle path characteristics at the large gravel-bed river Danube: results from a tracer study and numerical modelling. *Earth Surface Processes and Landforms* **38** : 512–522. DOI: 10.1002/esp.3338
- LIN CL, MILLER JD. 2005. 3D characterization and analysis of particle shape using X-ray microtomography (XMT). *Powder Technology* **154** : 61–69. DOI: 10.1016/j.powtec.2005.04.031
- LINDSEY DA, LANGER WH, VAN GOSEN BS. 2007. Using pebble lithology and roundness to interpret gravel provenance in piedmont fluvial systems of the Rocky Mountains, USA. *Sedimentary Geology* **199** : 223–232. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2007.02.006
- LUKAS S et al. 2013. Clast shape analysis and clast transport paths in glacial environments: A critical review of methods and the role of lithology. *Earth-Science Reviews* **121** : 96–116. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.02.005

- MACKIE W. 1897. On the laws that govern the rounding of particles of sand. *Transactions of the Edinburgh Geological Society* **7** : 298–311. DOI: 10.1144/transed.7.3.298
- MACKIN JH. 1956. Cause of braiding by a graded river. *Geological society of America Bulletin* **67** : 1717–1718.
- MACVICAR B, CHAPUIS M, BUCKRELL E, ROY A. 2015. Assessing the Performance of In-Stream Restoration Projects Using Radio Frequency Identification (RFID) Transponders. *Water* **7** : 5566–5591. DOI: 10.3390/w7105566
- MACVICAR BJ, PIÉGAY H, HENDERSON A, COMITI F, OBERLIN C, PECORARI E. 2009. Quantifying the temporal dynamics of wood in large rivers: field trials of wood surveying, dating, tracking, and monitoring techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* **34** : 2031–2046. DOI: 10.1002/esp.1888
- MACVICAR BJ, ROY AG. 2011. Sediment mobility in a forced riffle-pool. *Geomorphology* **125** : 445–456. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.10.031
- MALAVOI J-R, BRAVARD J-P. 2010. *Éléments d'hydromorphologie fluviale* . ONEMA.
- MALAVOI J-R, GARNIER C., LANDON N, RECKING A, BARAN P. 2011. *Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière* . ONEMA
- MANIATIS G, HOEY T, SVENTEK J. 2013. Sensor Enclosures: Example Application and Implications for Data Coherence. *Journal of Sensor and Actuator Networks* **2** : 761–779. DOI: 10.3390/jsan2040761
- MAO L, DELL'AGNESE A, COMITI F. 2016a. Sediment motion and velocity in a glacier-fed stream. *Geomorphology* DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.09.008 [online] Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X16308248> (Accessed 28 October 2016)
- MAO L, PICCO L, LENZI MA, SURIAN N. 2016b. Bed material transport estimate in large gravel-bed rivers using the virtual velocity approach: Virtual velocity for bed material transport estimate. *Earth Surface Processes and Landforms* DOI: 10.1002/esp.4000 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/esp.4000> (Accessed 28 October 2016)
- MAO L, SURIAN N. 2010. Observations on sediment mobility in a large gravel-bed river. *Geomorphology* **114** : 326–337. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.07.015
- MAY CL, PRYOR BS. 2014. Initial motion and bedload transport distance determined by particle tracking in a large regulated river. *River Research and Applications* **30** : 508–520. DOI: 10.1002/rra.2665
- MCMANARA JP, BORDEN C. 2004. Observations on the movement of coarse gravel using implanted motion-sensing radio transmitters. *Hydrological Processes* **18** : 1871–1884. DOI: 10.1002/hyp.1453
- MCMANARA JP, OATLEY JA, KANE DL, HINZMAN LD. 2008. Case study of a large summer flood on the North Slope of Alaska: bedload transport. *Hydrology Research* **39** : 299–308. DOI: 10.2166/nh.2008.006



- MEARS AI. 1979. Flooding and sediment transport in a small alpine drainage basin in Colorado. *Geology* **7** : 53. DOI: 10.1130/0091-7613(1979)7<53:FASTIA>2.0.CO;2
- MEYER-PETER E, Müller R. 1948. Formulas for Bed-Load transport. IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2 [online] Available from: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7> (Accessed 13 September 2017)
- MICHALIK A, BARTNIK W. 1994. An attempt at determination of incipient bed load motion in mountain streams. In *Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers*, . Springer, Berlin, Heidelberg; 289–299. [online] Available from: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/BFb0117846> (Accessed 2 October 2017)
- MIKOŠ M, JAEGGI MNR. 1995. Experiments on motion of sediment mixtures in a tumbling mill to study fluvial abrasion. *Journal of Hydraulic Research* **33** : 751–772. DOI: 10.1080/00221689509498550
- MILAN DJ. 2013. Virtual velocity of tracers in a gravel-bed river using size-based competence duration. *Geomorphology* **198** : 107–114. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.05.018
- MILLER IM, WARRICK JA. 2012. Measuring sediment transport and bed disturbance with tracers on a mixed beach. *Marine Geology* **299–302** : 1–17. DOI: 10.1016/j.margeo.2012.01.002
- MILLER IM, WARRICK JA, MORGAN C. 2011. Observations of coarse sediment movements on the mixed beach of the Elwha Delta, Washington. *Marine Geology* **282** : 201–214. DOI: 10.1016/j.margeo.2011.02.012
- MILLER KL, SZABÓ T, JEROLMACK DJ, DOMOKOS G. 2014. Quantifying the significance of abrasion and selective transport for downstream fluvial grain size evolution. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **119** : 2014JF003156. DOI: 10.1002/2014JF003156
- MILLER RL, BYRNE RJ. 1966. The angle of repose for a single grain on a fixed rough bed. *Sedimentology* **6** : 303–314. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1966.tb01897.x
- MIZUYAMA T et al. 2010. Calibration of a passive acoustic bedload monitoring system in Japanese mountain rivers. *US Geological Survey Scientific Investigations Report* **5091** : 296–318.
- MØEN KM, BOGEN J, ZUTA JF, ADE PK, ESBENSEN K. 2010. Bedload measurement in rivers using passive acoustic sensors. *US Geological Survey Scientific Investigations Report* **5091** : 336–351.
- MONTENEGRO RÍOS A, SAROCCHI D, NAHMAD-MOLINARI Y, BORSSELLI L. 2013. Form From Projected Shadow (FFPS): An algorithm for 3D shape analysis of sedimentary particles. *Computers & Geosciences* **60** : 98–108. DOI: 10.1016/j.cageo.2013.07.008
- MONTGOMERY DR, BUFFINGTON JM. 1998. Channel processes, classification, and response. In *River Ecology and Management. Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*, Naiman R, Bibly RE, and Kantor S (eds). New York; 13–42.

- MORRIS PH, WILLIAMS DJ. 1997. Exponential Longitudinal Profiles of Streams. *Earth Surface Processes and Landforms* **22** : 143–163. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199702)22:2<143::AID-ESP681>3.0.CO;2-Z
- MORRIS PH, WILLIAMS DJ. 1999. A worldwide correlation for exponential bed particle size variation in subaerial aqueous flows. *Earth Surface Processes and Landforms* **24** : 835–847. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199908)24:9<835::AID-ESP15>3.0.CO;2-G
- MOSLEY MP. 1978. Bed material transport in the Tamaki River near Dannevirke, North Island, New Zealand . New Zealand Forest Service (ed). New Zealand Forest Service: Wellington, N.Z.
- MOSLEY MP, TINDALE DS. 1985. Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* **10** : 465–482. DOI: 10.1002/esp.3290100506
- NANSON GC, KNIGHTON AD. 1996. Anabranching rivers: their cause, character and classification. *Earth Surface Processes and Landforms* **21** : 217–239. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199603)21:3<217::AID-ESP611>3.0.CO;2-U
- NATHAN BRADLEY D, TUCKER GE. 2012. Measuring gravel transport and dispersion in a mountain river using passive radio tracers. *Earth Surface Processes and Landforms* **37** : 1034–1045. DOI: 10.1002/esp.3223
- NICHOLS MH. 2004. A radio frequency identification system for monitoring coarse sediment particle displacement. *Applied engineering in agriculture* **20** : 783–787.
- NIELSEN P. 2009. *Coastal and Estuarine Processes* . World Scientific Publishing Company
- NIR D. 1964. Les processus érosifs dans le Nahal Zine (Néguev septentrional) pendant les saisons pluvieuses (1960-1961 — 1961-1962). *Annales de Géographie* **73** : 8–20. DOI: 10.3406/geo.1964.16573
- OKEY RJ, GREEN M, CARLING PA, LEE MWE, SEAR DA, WARBURTON J. 2005. Grain-Shape Analysis--A New Method for Determining Representative Particle Shapes for Populations of Natural Grains. *Journal of Sedimentary Research* **75** : 1065–1073. DOI: 10.2110/jsr.2005.079
- OLINDE L. 2015. Displacement and entrainment behavior of bedload clasts in mountain streams, University of Texas: Austin, May [online] Available from: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/32612/OLINDE-DISSERTATION-2015.pdf?sequence=1>
- OLINDE L, JOHNSON J. 2015. Using RFID and accelerometer-embedded tracers to measure probabilities of bed load transport, step lengths, and rest times in a mountain stream. *Water Resour. Res.* **51** : 7572–7589. DOI: 10.1002/2014wr016120
- OLINDE L, JOHNSON J, PIERSON F. 2012. Evaluating bedload transport with RFID and accelerometer tracers, airborne LiDAR and HEC-GeoRAS modeling: field experiments in Reynolds Creek, Idaho

- PAPANICOLAOU AN, ELHAKEEM M, TSAKIRIS A. 2010. Autonomous Measurements of Bridge Pier and Abutment Scour Using Motion-Sensing Radio Transmitter [online] Available from: <https://trid.trb.org/view.aspx?id=914926> (Accessed 27 October 2016)
- PARKER G. 1991a. Selective sorting and abrasion of river gravel. I: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering* **117** : 131–147.
- PARKER G. 1991b. Selective Sorting and Abrasion of River Gravel. II: Applications. *Journal of Hydraulic Engineering* **117** : 150–171. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:2(150)
- PARKER G, KLINGEMAN PC. 1982. On why gravel bed streams are paved. *Water Resources Research* **18** : 1409–1423. DOI: 10.1029/WR018i005p01409
- PARKER G, KLINGEMAN PC, MCLEAN DG. 1982. BEDLOAD AND SIZE DISTRIBUTION IN PAVED GRAVEL-BED STREAMS. *ASCE J Hydraul Div* **108** : 544–571.
- PARLAK S, MARSIC I. 2011. Non-intrusive localization of passive RFID tagged objects in an indoor workplace. 181–187 pp. [online] Available from: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6068635](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6068635) (Accessed 3 November 2016)
- PEARCE TH. 1971. Short Distance Fluvial Rounding of Volcanic Detritus. *SEPM Journal of Sedimentary Research* **Vol. 41** DOI: 10.1306/74D72400-2B21-11D7-8648000102C1865D [online] Available from: <http://jsedres.sepmonline.org/cgi/doi/10.1306/74D72400-2B21-11D7-8648000102C1865D> (Accessed 13 September 2017)
- PELOSI A, SCHUMER R, PARKER G, FERGUSON RI. 2016. The cause of advective slowdown of tracer pebbles in rivers: Implementation of Exner-Based Master Equation for coevolving streamwise and vertical dispersion: IMPLEMENTATION OF EBME. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **121** : 623–637. DOI: 10.1002/2015JF003497
- PENTLAND A. 1927. A method of measuring the angularity of sands. *Proceedings and Transactions of the Royal Society of Canada*
- PETTIJOHN FJ. 1949. *Sedimentary rocks* . Harper & Bros. New York
- PETTS GE. 1979. Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. *Progress in Physical Geography* **3** : 329–362. DOI: 10.1177/030913337900300302
- PHILLIPS CB, JEROLMACK DJ. 2014. Dynamics and mechanics of bed-load tracer particles. *Earth Surface Dynamics* **2** : 513–530. DOI: 10.5194/esurf-2-513-2014
- PHILLIPS CB, MARTIN RL, JEROLMACK DJ. 2013. Impulse framework for unsteady flows reveals superdiffusive bed load transport. *Geophysical Research Letters* **40** : 1328–1333. DOI: 10.1002/grl.50323
- PIÉGAY H. 2016. System approaches in fluvial geomorphology. In *Tools in Fluvial Geomorphology* , KONDOLF GM and PIÉGAY H (eds). John Wiley & Sons, Ltd; 75–102. [online] Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118648551.ch5/summary> (Accessed 2 November 2016)

- PIÉGAY H, ARNAUD F, CASSEL M, DEPRET T, ALBER A, MICHEL K, ROLLET A-J, VAUDOR L. 2016. Suivi par RFID de la mobilité des galets: retour sur 10 ans d'expérience en grandes rivières. BSGLG [online] Available from: <http://popups.ulg.ac.be/0770-7576/index.php?id=4476> (Accessed 24 August 2017)
- PIÉGAY H, GRANT G, NAKAMURA F, TRUSTRUM N. 2009. Braided river management: from assessment of river behaviour to improved sustainable development. *Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management*, Sambrook Smith GH, Best, JL, Bristow, CS, & Petts, GE (Eds) : 257–276.
- PISSART A, DUCHESNE F, VANBRABANT C. 1998. La détermination pratique des intervalles de confiance des comptages de cailloux et des mesures d'émoussé. Comparaison des mesures d'émoussé de Cailleux et de Krumbein. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* **4** : 195–214. DOI: 10.3406/morfo.1998.955
- PITON G, RECKING A. 2017. The concept of travelling bedload and its consequences for bedload computation in mountain streams: How to account for allogenic supply in bedload transport equations? *Earth Surface Processes and Landforms* **42** : 1505–1519. DOI: 10.1002/esp.4105
- POWERS MC. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research* **23** : 117–119. DOI: 10.1306/D4269567-2B26-11D7-8648000102C1865D
- PRYOR WA. 1971. Grain shape. In *Procedures in Sedimentary Petrology*, Carver RE (ed). Wiley: New York; 131–150.
- PYE WD, PYE MH. 1943. Sphericity determinations of pebbles and sand grains. *Journal of Sedimentary Research* **13** : 28–34. DOI: 10.1306/D4269184-2B26-11D7-8648000102C1865D
- PYRCE RS, ASHMORE PE. 2003. The relation between particle path length distributions and channel morphology in gravel-bed streams: a synthesis. *Geomorphology* **56** : 167–187. DOI: 10.1016/S0169-555X(03)00077-1
- RAMETTE, HEUZEL. 1962. Le Rhône à Lyon Etude de l'entraînement des galets à l'aide de traceurs radioactifs. *La Houille Blanche* : 389–399. DOI: 10.1051/lhb/1962011
- RAVAZZOLO D, MAO L, PICCO L, LENZI MA. 2015. Tracking log displacement during floods in the Tagliamento River using RFID and GPS tracker devices. *Geomorphology* **228** : 226–233. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.09.012
- RECKING A. 2009. Theoretical development on the effects of changing flow hydraulics on incipient bed load motion. *Water Resources Research* **45** : W04401. DOI: 10.1029/2008WR006826
- RECKING A, BACCHI V, NAAIM M, FREY P. 2009. Antidunes on steep slopes. *Journal of Geophysical Research* **114** DOI: 10.1029/2008JF001216 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2008JF001216> (Accessed 22 September 2016)
- RECKING A, FREY P, PAQUIER A, BELLEUDY P, CHAMPAGNE JY. 2008. Feedback between bed load transport and flow resistance in gravel and cobble bed rivers. *Water Resources*

Research **44** DOI: 10.1029/2007WR006219 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2007WR006219> (Accessed 13 September 2017)

RECKING A, PITON G, VAZQUEZ-TARRIO D, PARKER G. 2016. Quantifying the Morphological Print of Bedload Transport: Morphological Print. *Earth Surface Processes and Landforms* **41** : 809–822. DOI: 10.1002/esp.3869

RENNIE CD, CHURCH M. 2010. Mapping spatial distributions and uncertainty of water and sediment flux in a large gravel bed river reach using an acoustic Doppler current profiler. *Journal of Geophysical Research* **115** DOI: 10.1029/2009JF001556 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2009JF001556> (Accessed 13 September 2017)

RICE S, CHURCH M. 1998. Grain size along two gravel-bed rivers: statistical variation, spatial pattern and sedimentary links. *Earth Surface Processes and Landforms* **23** : 345–363. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199804)23:4<345::AID-ESP850>3.0.CO;2-B

RICE SL. 1995. The Spatial Variation and Routine Sampling of Spawning Gravels in Small Coastal Streams . Province of British Columbia, Ministry of Forests Research Program

RICE SP, CHURCH M. 1996. Sampling surficial fluvial gravels the precision of size distribution percentile estimates. *Journal of Sedimentary Research* **66** : 654–665.

RICHARDS K, CLIFFORD N. 1991. Fluvial geomorphology: structured beds in gravelly rivers. *Progress in Physical Geography* **15** : 407–422. DOI: 10.1177/030913339101500404

RICKENMANN D. 1991. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of hydraulic engineering* **117** : 1419–1439.

RICKENMANN D et al. 2014. Bedload transport measurements with impact plate geophones: comparison of sensor calibration in different gravel-bed streams: IMPACT PLATE GEOPHONE CALIBRATION. *Earth Surface Processes and Landforms* **39** : 928–942. DOI: 10.1002/esp.3499

RICKENMANN D. 2017. Bed-Load Transport Measurements with Geophones and Other Passive Acoustic Methods. *Journal of Hydraulic Engineering* **143** : 03117004. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001300

RICKENMANN D, TUROWSKI JM, FRITSCHI B, KLAIBER A, LUDWIG A. 2012. Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers: BEDLOAD TRANSPORT MEASUREMENTS IN THE ERLENBACH. *Earth Surface Processes and Landforms* **37** : 1000–1011. DOI: 10.1002/esp.3225

RIEBE CS, SKLAR LS, LUKENS CE, SHUSTER DL. 2015. Climate and topography control the size and flux of sediment produced on steep mountain slopes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* : 201503567. DOI: 10.1073/pnas.1503567112

RILEY NA. 1941. Projection Sphericity. *Journal of Sedimentary Research* **11** [online] Available from: <http://archives.datapages.com/data/sepm/journals/v01-32/data/011/011002/0094.htm> (Accessed 13 September 2017)

RIVIÈRE A. 1977. Méthodes granulométriques: techniques et interprétations . Paris, France

- ROBERT A. 2003. *River Processes: An Introduction to Fluvial Dynamics*. Arnold
- ROLLET A-J. 2007. Étude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain, Theses, Université Jean Moulin Lyon 3 [online] Available from: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00221368>
- ROLLET AJ, MACVICAR B, PIEGAY H, ROY A. 2008. L'utilisation de transpondeurs passifs pour l'estimation du transport sédimentaire: premiers retours d'expérience. *La Houille Blanche* : 110–116.
- ROSGEN DL. 1994. A classification of natural rivers. *CATENA* **22** : 169–199. DOI: 10.1016/0341-8162(94)90001-9
- ROUSSILLON T. 2006. Signature de forme discrète, application à l'analyse automatique de la forme des galets. [online] Available from: <http://liris.cnrs.fr/Documents/Liris-2779.pdf> (Accessed 15 December 2014)
- ROUSSILLON T, PIÉGAY H, SIVIGNON I, TOUGNE L, LAVIGNE F. 2009. Automatic computation of pebble roundness using digital imagery and discrete geometry. *Computers & Geosciences* **35** : 1992–2000. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.01.013
- ROUX A-L. 1982. Le Haut-Rhône français : lieu privilégié d'une recherche interdisciplinaire sur la gestion écologique des ressources en eau. *Revue de géographie de Lyon* **57** : 5–6.
- ROUX JPL. 2004. A Hydrodynamic Classification of Grain Shapes. *Journal of Sedimentary Research* **74** : 135–143.
- ROVIRA A, KONDOLF GM. 2008. Bed Mobility on the Deschutes River, Oregon: Tracer Gravel Results. *Geodinamica Acta* **21** : 11–22. DOI: 10.3166/ga.21.11-22
- RUBIN DM. 2004. A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital images of sediment. *Journal of Sedimentary Research* **74** : 160–165.
- RUSSELL RD. 1939. Effects of transportation on sedimentary particles: Part 1. Transportation [online] Available from: <http://archives.datapages.com/data/specpubs/sedimen1/data/a142/a142/0001/0000/0032.htm> (Accessed 25 August 2017)
- RUSSELL RD, TAYLOR RE. 1937. Roundness and Shape of Mississippi River Sands. *The Journal of Geology* **45** : 225–267. DOI: 10.1086/624526
- RUST BR. 1978. A classification of alluvial channel systems. In *Fluvial Sedimentology*, Miall AD (ed). Calgary; 187–198.
- SCHENK ER, MOULIN B, HUPP CR, RICHTER JM. 2014. Large wood budget and transport dynamics on a large river using radio telemetry: large wood budget and transport on a large river using radio telemetry. *Earth Surface Processes and Landforms* **39** : 487–498. DOI: 10.1002/esp.3463
- SCHMIDT K-H, ERGENZINGER P. 1992. Bedload entrainment, travel lengths, step lengths, rest periods—Studied with passive (iron, magnetic) and active (radio) tracer techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* **17** : 147–165.

SCHMIDT K-H, GINTZ D. 1995. Results of Bed load tracer experiments in a mountain river. In *River Geomorphology* , . Wiley: University of California; 37–54.

SCHNEIDER J, HEGGLIN R, MEIER S, TUROWSKI J, NITSCHKE M, RICKENMANN D. 2010. Studying sediment transport in mountain rivers by mobile and stationary RFID antennas. In *River Flow 2010: Proceedings of the 5th International Conference on Fluvial Hydraulics* , . Dittrich, K., Koll, A., Aberle, J., and Geisenhainer, P., Bundesanstalt: Braunschweig, Germany; 1723—1730.

SCHNEIDERHÖHN P. 1954. Eine vergleichende Studie über Methoden zur quantitativen Bestimmung von Abrundung und Form an Sandkörnern (Im Hinblick auf die Verwendbarkeit an Dünnschliffen.). *Heidelberger Beiträge zur Mineralogie und Petrographie* **4** : 172–191. DOI: 10.1007/BF01111154

SCHOKLITSCH A. 1933. Über die Verkleinerung der Geschiebe in Flussläufen . Hölder-Pichler-Tempsky

SCHUMM SA. 1960. The shape of alluvial channels in relation to sediment type . US Government Printing Office

SCHUMM SA. 1963. A Tentative Classification of Alluvial River Channels . United States Department of the Interior

SCHUMM SA. 1981. Evolution and Response of the Fluvial System, Sedimentologic Implications [online] Available from: [http://archives.datapages.com/data/sepm\\_sp/SP31/Evolution\\_and\\_Response.htm](http://archives.datapages.com/data/sepm_sp/SP31/Evolution_and_Response.htm) (Accessed 16 June 2017)

SCHUMM SA. 1985. Patterns of alluvial rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **13** : 5–27.

SCHUMM SA. 2003. *The Fluvial System* . The Blackburn Press: Caldwell, N.J

SCHUMM SA, STEVENS MA. 1973. Abrasion in Place: A Mechanism for Rounding and Size Reduction of Coarse Sediments in Rivers. *Geology* **1** : 37. DOI: 10.1130/0091-7613(1973)1<37:AIPAMF>2.0.CO;2

SCHWARCZ HP, SHANE KC. 1969. MEASUREMENT OF PARTICLE SHAPE BY FOURIER ANALYSIS. *Sedimentology* **13** : 213–231. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1969.tb00170.x

SEAL R, PAOLA C. 1995. Observations of Downstream Fining on the North Fork Toutle River Near Mount St. Helens, Washington. *Water Resources Research* **31** : 1409–1419. DOI: 10.1029/94WR02976

SEAR DA. 1996. SEDIMENT TRANSPORT PROCESSES IN POOL–RIFFLE SEQUENCES. *Earth Surface Processes and Landforms* **21** : 241–262. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199603)21:3<241::AID-ESP623>3.0.CO;2-1

SEAR DA, COLLINS MB, CARLING PA, LEE MWE, OAKLEY RJ. 2008. Coarse Sediment Transport Measurement in Rivers and on Coasts Using Advanced Particle Tracing Technologies. EPSRC Review Report for GR/L94987/01. [online] Available from: <http://www2.geog.soton.ac.uk/school/staff/profiles/das/epsrc.pdf> (Accessed 7 May 2015)

SHAW J, KELLERHALS R. 1982. The composition of recent alluvial gravels in Alberta river beds . Alberta Research Council: Edmonton

SHIELDS A. 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. PhD Thesis Technical University Berlin [online] Available from: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:61a19716-a994-4942-9906-f680eb9952d6?collection=research> (Accessed 13 September 2017)

SKLAR LS, Riebe CS, Marshall JA, Genetti J, Leclere S, Lukens CL, Merces V. 2017. The problem of predicting the size distribution of sediment supplied by hillslopes to rivers. *Geomorphology* **277** : 31–49. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.05.005

SMALLEY IJ. 1967. The presentation of subjective shape and roundness data. *Sedimentology* **8** : 35–38. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1967.tb01303.x

SNEED ED, FOLK RL. 1958. Pebbles in the Lower Colorado River, Texas a Study in Particle Morphogenesis. *The Journal of Geology* **66** : 114–150.

SOAR PJ, DOWNS PW. 2017. Estimating bedload transport rates in a gravel-bed river using seismic impact plates: Model development and application. *Environmental Modelling & Software* **90** : 182–200. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.01.012

STARK N, HAY AE, CHEEL R, LAKE CB. 2014. The impact of particle shape on the angle of internal friction and the implications for sediment dynamics at a steep, mixed sand–gravel beach. *Earth Surface Dynamics* **2** : 469–480. DOI: 10.5194/esurf-2-469-2014

STELCZER K. 1968. Investigation of bedload movement. presented at the Current Problems in River Training and Sediment Movement. Budapest. 9 pp.

STERNBERG H. 1875. Untersuchungen über längen- und querprofil geschiebeführender Flüsse . publisher not identified

STEVENS MA. 1969. Scour in riprap at culvert outlets, Colorado State University: Fort Collins

SUKUMARAN B, ASHMAWY AK. 2001. Quantitative characterisation of the geometry of discrete particles. *Géotechnique* **51** : 619–627. DOI: 10.1680/geot.2001.51.7.619

SURIAN N. 2002. Downstream variation in grain size along an Alpine river: analysis of controls and processes. *Geomorphology* **43** : 137–149. DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00127-1

SYVITSKI JPM (ed). 1991. Principles, methods, and application of particle size analysis . Cambridge University Press: Cambridge [online] Available from: <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9780511626142> (Accessed 13 September 2017)

SZABÓ T. 2013. A mechanics-based shape classification system and the numerical simulation of the collective shape evolution of pebbles, Budapest University of Technology and Economics [online] Available from: [http://www.omikk.bme.hu/collections/phd/Epiteszmernoki\\_Kar/2013/Szabo\\_Timea/tezis\\_eng.pdf](http://www.omikk.bme.hu/collections/phd/Epiteszmernoki_Kar/2013/Szabo_Timea/tezis_eng.pdf) (Accessed 11 December 2014)



SZABÓ T, DOMOKOS G. 2010. A new classification system for pebble and crystal shapes based on static equilibrium points. *Central European Geology* **53** : 1–19. DOI: 10.1556/CEuGeol.53.2010.1.1

SZABÓ T, DOMOKOS G, GROTZINGER JP, JEROLMACK DJ. 2015. Reconstructing the transport history of pebbles on Mars. *Nature Communications* **6** : 8366. DOI: 10.1038/ncomms9366

SZABÓ T, FITYUS S, DOMOKOS G. 2013. Abrasion model of downstream changes in grain shape and size along the Williams River, Australia: PEBBLE SHAPE EVOLUTION, WILLIAMS RIVER. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* **118** : 2059–2071. DOI: 10.1002/jgrf.20142

TAKASHIMIZU Y, IYOSHI M. 2016. New parameter of roundness R: circularity corrected by aspect ratio. *Progress in Earth and Planetary Science* **3** DOI: 10.1186/s40645-015-0078-x [online] Available from: <http://www.progearthplanetsci.com/content/3/1/2> (Accessed 7 October 2016)

TAKAYAMA S. 1965. Bedload movement in torrential mountain streams. *Tokyo Geographical Paper* **9** : 169–188.

TELLER JT. 1976. Equantcy versus sphericity. *Sedimentology* **23** : 427–428. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1976.tb00061.x

THOMPSON DM. 1995. The effects of large organic debris on sediment processes and stream morphology in Vermont. *Geomorphology* **11** : 235–244. DOI: 10.1016/0169-555X(94)00064-X

THORNE CR. 1997. Channel types and morphological classification. In *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management* , Thorne CR, Hey RD, and Newson MD (eds). Chichester ; New York : John Wiley; 175–222.

THORNE CR, LEWIN J. 1979. Bank processes, bed material movement and planform development in a meandering river. In *Adjustments of the Fluvial System* , . Kendall/Hunt: Dubuque, Iowa; 117–137.

THORP JH, THOMS MC, DELONG M. 2008. *The Riverine Ecosystem Synthesis* . Elsevier [online] Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123706126X00010> (Accessed 6 July 2017)

TICKELL FG. 1931. *The Examination Of Fragmental Rocks* . Stanford University Press. [online] Available from: <http://archive.org/details/examinationoffra031724mbp> (Accessed 27 June 2017)

TOUCHART L. 2005. *Hydrosystème - Hypergéó* [online] Available from: <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article313> (Accessed 15 June 2017)

TRUIJENS M, WANG X, de GRAAF H, LIU JJ. 2014. Evaluating the Performance of Absolute RSSI Positioning Algorithm-Based Microzoning and RFID in Construction Materials Tracking. *Mathematical Problems in Engineering* **2014** : e784395. DOI: 10.1155/2014/784395

- TSAKIRIS AG, PAPANICOLAOU AN, MOUSTAKIDIS IV, ABBAN BK. 2015. Identification of the Burial Depth of Radio Frequency Identification Transponders in Riverine Applications. *Journal of Hydraulic Engineering* [online] Available from: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001001](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001001) (Accessed 2 April 2015)
- TUROWSKI JM, BADOUX A, RICKENMANN D. 2011. Start and end of bedload transport in gravel-bed streams. *Geophysical Research Letters* **38** : n/a-n/a. DOI: 10.1029/2010GL046558
- URBONAS BR. 1968. Forces on a bed particle in a dumped rock stilling basin, Colorado State University: Fort Collins
- VAN RIJN LEO C. 1984. Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering* **110** : 1431–1456. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431)
- VARKONYI PL, DOMOKOS G. 2006. Static Equilibria of Rigid Bodies: Dice, Pebbles, and the Poincare-Hopf Theorem. *Journal of Nonlinear Science* **16** : 255–281. DOI: 10.1007/s00332-005-0691-8
- VÁZQUEZ-TARRÍO D, MENÉNDEZ-DUARTE R. 2014. Bedload transport rates for coarse-bed streams in an Atlantic region (Narcea River, NW Iberian Peninsula). *Geomorphology* **217** : 1–14. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.04.015
- VÁZQUEZ-TARRÍO D, MENÉNDEZ-DUARTE R. 2015. Assessment of bedload equations using data obtained with tracers in two coarse-bed mountain streams (Narcea River basin, NW Spain). *Geomorphology* **238** : 78–93. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.02.032
- VERDÚ JM, BATALLA RJ, MARTÍNEZ-CASASNOVAS JA. 2005. High-resolution grain-size characterisation of gravel bars using imagery analysis and geo-statistics. *Geomorphology* **72** : 73–93. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.04.015
- VERICAT D, CHURCH M, BATALLA RJ. 2006. Bed load bias: Comparison of measurements obtained using two (76 and 152 mm) Helley-Smith samplers in a gravel bed river. *Water Resources Research* **42** DOI: 10.1029/2005WR004025 [online] Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2005WR004025> (Accessed 13 September 2017)
- WADELL H. 1932. Volume, Shape, and Roundness of Rock Particles. *The Journal of Geology* **40** : 443–451.
- WADELL H. 1933. Sphericity and Roundness of Rock Particles. *The Journal of Geology* **41** : 310–331.
- WADELL H. 1935. Volume, Shape, and Roundness of Quartz Particles. *The Journal of Geology* **43** : 250–280.
- WALD QR. 1990. The form of pebbles. *Nature* **345** : 211–211. DOI: 10.1038/345211a0
- WARRICK JA, RUBIN DM, RUGGIERO P, HARNEY JN, DRAUT AE, BUSCOMBE D. 2009. Cobble cam: grain-size measurements of sand to boulder from digital photographs and autocorrelation analyses. *Earth Surface Processes and Landforms* **34** : 1811–1821. DOI: 10.1002/esp.1877

- WENTWORTH CK. 1922a. A method of measuring and plotting the shapes of pebbles . US Government Printing Office [online] Available from: <http://pubs.usgs.gov/bul/0730c/report.pdf> (Accessed 23 March 2016)
- WENTWORTH CK. 1922b. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology* **30** : 377–392.
- WENTWORTH CK. 1919. A laboratory and field study of cobble abrasion. *The Journal of Geology* **27** : 507–521.
- WENTWORTH CK. 1921. Quantitative studies of the shapes of pebbles [online] Available from: <http://ir.uiowa.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4263&context=etd> (Accessed 18 March 2016)
- WENTWORTH CK. 1933. The Shapes of Rock Particles: A Discussion. *The Journal of Geology* **41** : 306–309.
- WHITE CM. 1940. The Equilibrium of Grains on the Bed of a Stream. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **174** : 322–338. DOI: 10.1098/rspa.1940.0023
- WHITING PJ, KING JG. 2003. Surface particle sizes on armoured gravel streambeds: effects of supply and hydraulics. *Earth Surface Processes and Landforms* **28** : 1459–1471. DOI: 10.1002/esp.1049
- WIBERG PL, SMITH JD. 1987. Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water Resources Research* **23** : 1471–1480. DOI: 10.1029/WR023i008p01471
- WILCOCK PR. 1997. Entrainment, displacement and transport of tracer gravels. *Earth Surface Processes and Landforms* **22** : 1125–1138.
- WILCOCK PR, BARTA AF, SHEA CC, KONDOLF GM, MATTHEWS WVG, PITLICK J. 1996. Observations of Flow and Sediment Entrainment on a Large Gravel-Bed River. *Water Resources Research* **32** : 2897–2909. DOI: 10.1029/96WR01628
- WILCOCK PR, MCARDELL BW. 1993. Surface-based fractional transport rates Mobilization thresholds and partial transport of a sand-gravel sediment. *Water Resources Research* **29** : 1297–1312. DOI: DOI: 10.1029/92WR02748
- WILLIAMS EM. 1965. A method of indicating pebble shape with one parameter. *Journal of Sedimentary Research* **35** : 993–996.
- WITTENBERG L. 2002. Structural patterns in coarse gravelriver beds: typology, survey and assessment of the roles of grain size and river regime. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography* **84** : 25–37. DOI: 10.1111/j.0435-3676.2002.00159.x
- WOLMAN MG. 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Eos, Transactions American Geophysical Union* **35** : 951–956. DOI: 10.1029/TR035i006p00951

WONG M, PARKER G, DEVRIES P, BROWN TM, BURGESS SJ. 2007. Experiments on dispersion of tracer stones under lower-regime plane-bed equilibrium bed load transport. *Water Resources Research* **43** : n/a-n/a. DOI: 10.1029/2006WR005172

WYSS CR, RICKENMANN D, FRITSCHI B, TUROWSKI JM, WEITBRECHT V, BOES RM. 2016a. Laboratory flume experiments with the Swiss plate geophone bedload monitoring system. Part I: Impulse counts and particle size identification. *Water Resources Research* **52** : 7744–7759. DOI: 10.1002/2015WR018555

WYSS CR, RICKENMANN D, FRITSCHI B, TUROWSKI JM, WEITBRECHT V, TRAVAGLINI E, BARDOU E, BOES RM. 2016b. Laboratory flume experiments with the Swiss plate geophone bedload monitoring system. Part II: Application to field sites with direct bedload samples. *Water Resources Research* **52** : 7760–7778. DOI: 10.1002/2016WR019283

YALIN MS, SILVA AMF da. 2001. *Fluvial processes* . IAHR

YAZAWA T. 1990. More pebbles. *Nature* **348** : 398–398. DOI: 10.1038/348398c0

YUZYK TR, WINKLER T. 1991. *Procedures for bed-material sampling* . Environment Canada, Water Resources Branch, Sediment Survey Section: Ottawa, Canada

ZHAO B, WANG J. 2016. 3D quantitative shape analysis on form, roundness, and compactness with  $\mu$ CT. *Powder Technology* **291** : 262–275. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.12.029

ZINGG T. 1935. *Beitrag zur Schotteranalyse*, Zürich [online] Available from: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:21472/eth-21472-02.pdf> (Accessed 18 March 2016)



# LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. SCHÉMATISATION DU CONCEPT DE SYSTÈME FLUVIAL DE (SCHUMM, 2003) MODIFIÉ D'APRÈS (CHURCH, 2002) DANS (CHAPUIS, 2012).	- 18 -
FIGURE 2. SCHÉMATISATION DE L'HYDROSYSTÈME FLUVIAL (D'APRÈS AMOROS ET PETTS, 1993).	- 18 -
FIGURE 3. HIÉRARCHISATION DES VARIABLES DU SYSTÈME FLUVIAL (MODIFIÉ D'APRÈS THORNE, 1997).	- 19 -
FIGURE 4. BALANCE DE LANE/BORLAND.	- 21 -
FIGURE 5. REPRÉSENTATION THÉORIQUE DE L'ÉQUILIBRE DYNAMIQUE DU SYSTÈME FLUVIAL ET DE SA RÉPONSE TEMPORAIRE OU DURABLE À UNE PERTURBATION BRUTALE PROVISoire OU DURABLE (ADAPTÉ D'APRÈS SEAR, 1996 DANS MALAVOI <i>ET AL.</i> , 2010 ET KNIGHTON, 1998).	- 22 -
FIGURE 6. ECHELLES TEMPORELLES DES AJUSTEMENTS DES DIFFÉRENTES COMPOSANTES GÉOMORPHOLOGIQUES D'UN SYSTÈME FLUVIAL (KNIGHTON, 1984).	- 23 -
FIGURE 7. SECTORISATION HIÉRARCHISÉE DU SYSTÈME FLUVIAL (ADAPTÉE PAR CHAPUIS, 2012 D'APRÈS FRISSELL <i>ET AL.</i> , 1986).	- 24 -
FIGURE 8. ÉVOLUTION DE LA CAPACITÉ DE TRANSPORT ET DE LA FOURNITURE SÉDIMENTAIRE GROSSIÈRE EN FONCTION DU PROFIL EN LONG (MONTGOMERY ET BUFFINGTON, 1997).	- 25 -
FIGURE 9. EVOLUTION DES PARAMÈTRES (A) PHYSIQUES ET DE LA MORPHOLOGIE DU LIT DU COURS D'EAU ET (B) RELATIFS AU TRANSPORT SÉDIMENTAIRE EN FONCTION DE LA DISTANCE À LA SOURCE (ADAPTÉE D'APRÈS CHURCH, 2002 ET CHAPUIS, 2012).	- 26 -
FIGURE 10. CLASSIFICATION DES STYLES FLUVIAUX DE ROSGEN (1994). PROFILS EN TRAVERS ET DESSIN EN PLAN DES CHENAUX DES PRINCIPAUX STYLES (EN HAUT) ET CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES SOUS-TYPES (EN BAS).	- 29 -
FIGURE 11. CLASSIFICATION DES STYLES FLUVIAUX D'APRÈS SCHUMM (1981) DANS KNIGHTON (1998) ET CHAPUIS, 2012.	- 29 -
FIGURE 12. ÉVOLUTION DES STYLES FLUVIAUX EN FONCTION DE LA PENTE ET DU DÉBIT MORPHOGÈNE (CHURCH, 2002).	- 29 -
FIGURE 13. CLASSIFICATION DES STYLES FLUVIAUX DE CHURCH (2006) EN FONCTION DU VOLUME DE LA CHARGE SÉDIMENTAIRE, DE LA TAILLE DES SÉDIMENTS ET DE LA STABILITÉ DES FORMES.	- 30 -
FIGURE 14. DIFFÉRENCES DANS LES DÉFINITIONS DES AXES A ET B PROPOSÉES PAR YUZYK ET WINKERS (1991, LIGNES EN POINTILLÉES) ET GORDON <i>ET AL.</i> (1992, LIGNES SOLIDES) DANS BUNTE ET APT (2001).	- 35 -
FIGURE 15. STRATIFICATION GRANULOMÉTRIQUE D'UN LIT ARMURÉ (BUNTE ET APT, 2001).	- 37 -
FIGURE 16. SCHÉMAS D'ÉCHANTILLONNAGE COMMUNÉMENT UTILISÉS POUR L'ÉCHANTILLONNAGE DES COURS D'EAU À CHARGE GROSSIÈRES (BUNTE ET APT, 2001).	- 39 -
FIGURE 17. ILLUSTRATION DES TROIS SOURCES POTENTIELLES DE SOUS-ESTIMATION DE LA TAILLE DE PARTICULES SÉDIMENTAIRES PAR PHOTOGRAPHIE (GRAHAM <i>ET AL.</i> , 2010).	- 41 -
FIGURE 18. DISTINCTION ENTRE FORME, ÉMOUSSÉ ET TEXTURE DE SURFACE (D'APRÈS BARRETT, 1980).	- 44 -
FIGURE 19. DIAGRAMMES ORIGINAUX DES FORMES DE ZINGG (1935).	- 45 -
FIGURE 20. DIAGRAMMES DE FORME DE ZINGG (1935) D'APRÈS BLOTT ET PYE (2008) ET AVEC L'INDICE DE SPHÉRICITÉ DE KRUMBEIN (1941).	- 53 -
FIGURE 21. DIAGRAMME DE FORME DE SNEED ET FOLK (1958), D'APRÈS BLOTT ET PYE (2008).	- 53 -
FIGURE 22. DIAGRAMMES DE FORME DE BLOTT ET PYE (2008) AVEC LA DICHOTOMIE NON-ÉMOUSSÉ (A ET B) ET ÉMOUSSÉ (C ET D).	- 53 -
FIGURE 23. REPRÉSENTATION DES EXPÉRIMENTATIONS POUR L'IDENTIFICATION DES POINTS D'ÉQUILIBRE PAR LA MÉTHODE DE SZABÓ ET DOMOKOS (2010).	- 54 -
FIGURE 24. DIAGRAMMES DES CLASSES DE FORME DE (DOMOKOS <i>ET AL.</i> , 2009).	- 55 -
FIGURE 25. SCHÉMAS ILLUSTRATIFS DES MÉTHODES DE CALCULS DES INDICES D'ÉMOUSSÉ (BLOTT ET PYE, 2008).	- 58 -
FIGURE 26. REPRÉSENTATION DE LA MESURE DES COORDONNÉES POLAIRES DES POINTS DE L'ENVELOPPE D'UNE PARTICULE.	- 59 -
FIGURE 27. REPRÉSENTATION DE L'OUVERTURE MORPHOLOGIQUE DE LA SILHOUETTE D'UNE PARTICULE (DANS DREVIN (2002)).	- 59 -
FIGURE 28. LES CHARTES VISUELLES D'ÉMOUSSÉ DE (A) RUSSEL ET TAYLOR (1937), (B) KRUMBEIN (1941), (C) POWERS (1953), (D) RUSSEL ET TAYLOR D'APRÈS PRYOR (1971) ET (E) CROFT (1974).	- 62 -
FIGURE 29. DIAGRAMME DE HJULSTRÖMS (1935).	- 72 -
FIGURE 30. DÉMARCHE DE CONCEPTION D'UNE EXPÉRIMENTATION DE TRAÇAGE SÉDIMENTAIRE (ADAPTÉE D'APRÈS HASSAN ET ROY (2003)).	- 76 -
FIGURE 31. RÉFLEXIONS ET COMPROMIS LIÉS AU CHOIX D'UNE MÉTHODE DE TRAÇAGE SÉDIMENTAIRE.	- 79 -
FIGURE 32. FACTEURS QUI INFLUENCENT <i>IN SITU</i> LA MISE EN MOUVEMENT ET LE DÉPLACEMENT D'UNE PARTICULE SÉDIMENTAIRE (MODIFIÉ D'APRÈS CHAPUIS, 2012).	- 85 -

FIGURE 33. CONCEPT D'ANGLE DE REPOS DE WHITE (1940).....	- 86 -
FIGURE 34. SCHÉMATISATION DE L'ANGLE DE REPOS D'UNE PARTICULE ET DES FACTEURS L'AFFECTANT, DANS KIRCHNER <i>ET AL.</i> , (1990).....	- 88 -
FIGURE 35. LES DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX DE TYPES TAMBOURS À AXE HORIZONTAL UTILISÉS PAR (A) KRUMBEIN (1941), (B) MIKOS ET JAECCI (1995) ET (C) KODAMA (1994), DANS ATTAL (2003).....	- 93 -
FIGURE 36. VUE SUPÉRIEURE (I) ET TRANSVERSALE (II) DU CANAL CIRCULAIRE DE (KUENEN, 1955, 1956) DANS ATTAL (2003).....	- 94 -
FIGURE 37. VU SCHÉMATIQUE SUPÉRIEURE (A) ET COUPE TRANSVERSALE (B) DU CANAL ANNULAIRE DE ATTAL (2003) ET (C) PHOTOGRAPHIE DE L'INTÉRIEUR DU CANAL.....	- 95 -
FIGURE 38. ILLUSTRATION DE L'ÉVOLUTION D'UNE FORME EN DEUX DIMENSIONS D'UNE PARTICULE SÉDIMENTAIRE POUR UN PETIT (A) OU GRAND (B) RAPPORT R/R (SZABÓ <i>ET AL.</i> , 2013). .....	- 99 -
FIGURE 39. ILLUSTRATION DES DEUX PHASES D'ABRASION PAR ATTRITION D'UNE PARTICULE SÉDIMENTAIRE (DOMOKOS <i>ET AL.</i> , 2014).....	- 100 -
FIGURE 40. INTERRELATIONS ENTRE LES ÉLÉMENTS DU TRIPTYQUE THÉMATIQUE DE LA THÈSE TOUCHANT AUX PARTICULES SÉDIMENTAIRES GROSSIÈRES. ....	- 103 -
FIGURE 41. LONGUEURS DES AXES B DES GALETS CALCAIRES ET SYNTHÉTIQUES ÉQUIPÉS DE TRANSPONDEURS. ....	- 113 -
FIGURE 42. LE CANAL ANNULAIRE D'ATTAL (2003) ÉQUIPÉ AVEC LE SYSTÈME DE LECTURE DES TRANSPONDEURS PIT TAGS. ....	- 114 -
FIGURE 43. DISTRIBUTIONS DES DENSITÉS DES GALETS CALCAIRES ET SYNTHÉTIQUES, ÉQUIPÉS ET NON-ÉQUIPÉS DE TRANSPONDEURS.....	- 118 -
FIGURE 44. STRUCTURES DE MOBILITÉ DES GALETS MONITORÉS EN FONCTION DES VITESSES PAR TOURS (A, C ET E) ET DES DISTANCES PARCOURUES (B, D ET E).....	- 120 -
FIGURE 45. PHÉNOMÈNES D'ÉROSION OBSERVÉS SUR LES GALETS CALCAIRES ET SYNTHÉTIQUES.....	- 122 -
FIGURE 46. PHÉNOMÈNES D'ÉROSION OBSERVÉS SUR LES GALETS CALCAIRES (A) ET SYNTHÉTIQUES (B) EN FONCTION DE LA MÉTHODE D'ÉQUIPEMENT. ....	- 123 -
FIGURE 47. GALETS CALCAIRES B03 (A ET B) ET B02 (C ET D) AVANT (A ET C) ET APRÈS FRAGMENTATION (B ET D).....	- 124 -
FIGURE 48. LES GALETS CALCAIRES A03 (A ET B), A14 (C ET D), B26 (E ET F), D24 (G ET H) ET D25 (I ET J) AVANT (A, C, E, G ET I) ET APRÈS (B, D, F, H ET J) FRAGMENTATION.....	- 124 -
FIGURE 49. FRÉQUENCES CUMULÉES DU RATIO LONGUEUR DU PIT TAG SUR L'AXE PERCÉ DU GALET. ....	- 125 -
FIGURE 50. PROPORTION DE MASSE INITIALE PERDUE PAR KILOMÈTRE VOYAGÉ (A) PAR TYPE DE GALET ET (B) EN FONCTION DES DEUX DÉBITS INVESTIGUÉS. ....	- 126 -
FIGURE 51. PART CUMULÉE DE LA MASSE INITIALE DES GALETS CALCAIRES FRACTURÉE OU FRAGMENTÉE APRÈS CHAQUE EXPÉRIMENTATION D'USURE.....	- 127 -
FIGURE 52. PROPORTION DE LA MASSE INITIALE PERDUE PAR KILOMÈTRE VOYAGÉ EN FONCTION DU TYPE DE GALET ET L'ÉQUIPEMENT RFID. ....	- 128 -
FIGURE 53. MATÉRIEL D'IDENTIFICATION RADIOFRÉQUENCE UTILISÉ.....	- 141 -
FIGURE 54. ÉQUIPEMENT ET POSITIONNEMENT DU MÂT DE 4 MÈTRES DE LONGUEUR. ....	- 143 -
FIGURE 55. CONFIGURATION POUR LES TESTS DE DÉTECTION DES TAGS EN SITUATION D'ENFOUISSEMENT. ....	- 145 -
FIGURE 56. MATÉRIEL UTILISÉ POUR L'ÉVALUATION DE LA PRÉCISION SPATIALE DU POSITIONNEMENT DES TRANSPONDEURS.....	- 146 -
FIGURE 57. DISTRIBUTION SPATIALE DES POINTS DE DÉTECTION DES TRANSPONDEURS POUR LES QUATRES STRATÉGIES D'ÉCHANTILLONNAGE SIMULÉES.....	- 148 -
FIGURE 58. ÉVOLUTION DES VALEURS DU RSSI DES 4 TRANSPONDEURS EN FONCTION DE LA PROFONDEUR D'IMMERSION ET DE LA HAUTEUR DE L'ANTENNE PAR RAPPORT À LA SURFACE DE L'EAU. ....	- 151 -
FIGURE 59. VARIATION DES VALEURS DU RSSI AU COURS D'UNE PÉRIODE DE MESURE. ....	- 151 -
FIGURE 60. ÉVOLUTION DES VALEURS DE RSSI EN FONCTION DE LA PROFONDEUR D'IMMERSION SUR LES DEUX DIFFÉRENTS SITES D'ÉTUDE.....	- 152 -
FIGURE 61. ÉVOLUTION DES VALEURS MOYENNE DU RSSI EN FONCTION DE LA PROFONDEUR D'ENFOUISSEMENT, DE LA POSITION DE L'ANTENNE ET DE L'ORIENTATION DES TRANSPONDEURS.....	- 153 -
FIGURE 62. ÉVOLUTION DES VALEURS MOYENNES DU RSSI EN FONCTION DE LA PROFONDEUR D'ENFOUISSEMENT, DE L'ORIENTATION DES TRANSPONDEURS ET DE LA DISTANCE AU MÂT AVEC L'ANTENNE PERPENDICULAIRE À LA SURFACE DE GRAVIER.....	- 155 -
FIGURE 63. PRÉCISION DES POSITIONS ESTIMÉES EN FONCTION DE LA STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE, DE L'INTERVALLE D'ÉMISSION DU SIGNAL AND DE LA MÉTHODE D'ESTIMATION DE LA POSITION. ....	- 156 -
FIGURE 64. PRÉCISION DES POSITIONS ESTIMÉES PAR INTERPOLATION SPATIALE DU RSSI EN FONCTION DU NOMBRE DE DÉTECTIONS. ....	- 160 -
FIGURE 65. PRÉCISIONS DES POSITIONS ESTIMÉES PAR INTERPOLATION SPATIALE DE L'INTENSITÉ DU SIGNAL EN FONCTION DU POINT D'INTENSITÉ LA PLUS FORTE DÉTECTÉE. ....	- 161 -

FIGURE 66. CARTE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PROGO SUR L'ÎLE DE JAVA. ....	- 175 -
FIGURE 67. EXEMPLE DE PHOTOGRAPHIES POUR L'ANALYSE DE L'ÉMOUSSÉ DES ÉCHANTILLONS ANGULEUX M1 (À GAUCHE) ET ÉMOUSSÉ M2 (À DROITE).....	- 176 -
FIGURE 68. DISTRIBUTIONS DES 3 DESCRIPTEURS DE L'ÉMOUSSÉ ( $rD$ , $rP$ , ET $rW$ ) ET DE L'AXE B DES ÉCHANTILLONS DE PARTICULES UTILISÉS POUR LES ANALYSES (B1, B2, M1 ET M2). ....	- 176 -
FIGURE 69. EXEMPLES DE MAUVAISES CLASSIFICATIONS DES PIXELS PENDANT L'ÉTAPE DE SEGMENTATION DES IMAGES. ....	- 179 -
FIGURE 70. LE CANAL ANNULAIRE D'ATTAL (2003) ÉQUIPÉ DU SYSTÈME RFID PASSIVE BASSE FRÉQUENCE PIT TAG. ....	- 180 -
FIGURE 71. DISTRIBUTIONS DES 3 DESCRIPTEURS DE L'ÉMOUSSÉ ( $rD$ , $rP$ , ET $rW$ ) ET DE L'AXE B DES ÉCHANTILLONS M1 (ANGULEUX) ET M2 (ÉMOUSSÉ) EN FONCTION DE LA FACE EXPOSÉE.....	- 182 -
FIGURE 72. DISTRIBUTIONS DES 3 DESCRIPTEURS DE L'ÉMOUSSÉ ( $rD$ , $rP$ , ET $rW$ ) ET DE L'AXE B DES ÉCHANTILLONS M1 (ANGULEUX) ET M2 (ÉMOUSSÉ) EN FONCTION DE LA ET DU TRAITEMENT DES PHOTOGRAPHIES. ....	- 185 -
FIGURE 73. DISTRIBUTIONS DES ERREURS RELATIVES DES 16TH, 50TH ET 84TH PERCENTILES OBTENUES EN FONCTION DES TAILLES D'ÉCHANTILLON BOOTSTRAP. ....	- 188 -
FIGURE 74. PHOTOGRAPHIES DE L'ÉCHANTILLON M1 (ANGULEUX) AVANT (A) ET APRÈS (B) LES 8 EXPÉRIMENTATIONS D'ABRASION. ....	- 190 -
FIGURE 75. ÉVOLUTIONS DES DESCRIPTEURS D'ÉMOUSSÉ ET DE TAILLE EN FONCTION DE LA DISTANCE DE TRANSFERT.....	- 191 -
FIGURE 76. RELATIONS ENTRE L'ABRASION CUMULÉE (EN % DE LA MASSE INITIALE PERDUE) AU COURS DES 8 EXPÉRIMENTATIONS D'ABRASION ET L'ÉMOUSSÉ DÉFINI PAR LES DESCRIPTEURS $rD$ (A), $rP$ (B) ET $rW$ (C).- 194 -	
FIGURE 77. PHOTOGRAPHIE DES 4 FORMES ÉTUDIÉES. ....	- 203 -
FIGURE 78. DISTANCES DE TRANSPORT CUMULÉES EN FONCTION DU TEMPS POUR LES 4 FORMES ET 4 DENSITÉS DES PARTICULES ÉTUDIÉES. ....	- 205 -
FIGURE 79. VITESSE MOYENNE DE TRANSIT DES PARTICULES ÉTUDIÉES EN FONCTION DE LA FORME ET DE LA DENSITÉ.....	- 206 -
FIGURE 80. DENSITÉ DES TEMPS AU TOUR MESURÉS À DÉBITS FAIBLES ( $240\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ ) ET ÉLEVÉS ( $350\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ ). ...	- 213 -
FIGURE 81. COMPOSANTES ESSENTIELLES À LA RÉALISATION D'UNE RECHERCHE DES TRANSPONDEURS A-UHF PAR DRONE. ....	- 216 -
FIGURE 82. ADAPTATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES TRANSPONDEURS A-UHF SUR UN DRONE.....	- 217 -
FIGURE 83. PHOTOGRAPHIE D'UN HARNAIS DE TRANSPORT DU GPS ET DU SYSTÈME A-UHF RFID.....	- 217 -
FIGURE 84. TRAJECTOIRES DES TRACEURS OBSERVÉES APRÈS LE PREMIER SUIVI SUR LE SITE AMONT DU CANAL DE MIRIBEL. ....	- 218 -





## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. CLASSIFICATION HIÉRARCHIQUE DES FORMES SÉDIMENTAIRES PROPRES AUX RIVIÈRES À CHARGE GRAVELEUSE (SIMPLIFIÉ DE HOEY, 1992 PAR LIÉBAULT, 2003). .....	- 31 -
TABLEAU 2. CLASSES GRANULOMÉTRIQUES DE WENTWORTH (1922). .....	- 36 -
TABLEAU 3. CONVERSION ENTRE MÉTHODES D'ANALYSE ET D'ÉCHANTILLONNAGE GRANULOMÉTRIQUE .....	- 41 -
TABLEAU 4. FACTEURS DE CONVERSION ENTRE DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ANALYSE ET ÉCHANTILLONNAGE..	- 42 -
TABLEAU 5. INDICES DE FORMES, DE SPHÉRICITÉ ET D'ÉMOUSSÉ COMMUNÉMENT UTILISÉS. ....	50
TABLEAU 6. DESCRIPTION DES PARAMÈTRES ET CLASSES DES CHARTES VISUELLES D'ÉMOUSSÉ. ....	- 61 -
TABLEAU 7. INDICES DE FORME, D'ÉMOUSSÉ ET DE TEXTURE DE SURFACE COMMUNÉMENT UTILISÉS. ....	- 63 -
TABLEAU 8. DESCRIPTEURS DE FORME ET D'ÉMOUSSÉ DES PARTICULES SÉDIMENTAIRES CALCULÉS LA TOOLBOX L'ALGORITHME DE ROUSSILLON <i>ET AL.</i> (2009). .....	- 65 -
TABLEAU 9. MÉTHODES DE TRAÇAGE DES SÉDIMENTS (ADAPTÉE D'APRÈS HASSAN ET ROY, 2016) .....	78
TABLEAU 10. TAUX DE RETOUR DE DIFFÉRENTES MÉTHODES DE TRAÇAGE (ADAPTÉ DE HASSAN ET ROY (2016)). ..	81 -
TABLEAU 11. LES PROCESSUS D'ÉROSION DES PARTICULES SÉDIMENTAIRES ET LEUR OCCURRENCE SELON DIFFÉRENTES UNITÉS DU SYSTÈME FLUVIAL (ADAPTÉ D'APRÈS ATTAL (2003) ET KUENEN (1956)) .....	97
TABLEAU 12. FACTEURS DIRIGEANT L'ÉROSION DES PARTICULES SÉDIMENTAIRES (ADAPTÉ D'APRÈS KUENEN (1956) ET ATTAL (2003)) .....	- 98 -
TABLEAU 13. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES TRANSPONDEURS UTILISÉES. ....	- 109 -
TABLEAU 14. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES (A) GALETS CALCAIRES MODÈLES POUR LE MOULAGE ET (B) DES GALETS UTILISÉS POUR LES SUIVIS DE MOBILITÉ. ....	- 111 -
TABLEAU 15. DESCRIPTIFS DES DEUX SETS D'EXPÉRIENCES. ....	- 116 -
TABLEAU 16. VITESSES ET DISTANCES DE TRANSPORT DES GALETS SYNTHÉTIQUES AU COURS DES EXPÉRIENCES DE SUIVIS DE MOBILITÉ. ....	- 119 -
TABLEAU 17. ESTIMATIONS DES DISTANCES DE TRANSPORT EN MÈTRES DES GALETS CALCAIRES ET SYNTHÉTIQUES DURANT LES EXPÉRIENCES D'ABRASION. ....	- 122 -
TABLEAU 18. ANALYSES STATISTIQUES DES DIFFÉRENCES ENTRE LES PRÉCISIONS DES POSITIONS ESTIMÉES OBTENUES POUR LES INTERVALLES D'ÉMISSIONS DU SIGNAL INDÉPENDAMMENT DE LA STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE. ....	- 157 -
TABLEAU 19. ANALYSES STATISTIQUES DES DIFFÉRENCES ENTRE LES PRÉCISIONS DES POSITIONS ESTIMÉES OBTENUES POUR LES TROIS INTERVALLES D'ÉMISSION DU SIGNAL AND TESTÉES POUR CHAQUE MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE. ....	- 157 -
TABLEAU 20. ANALYSES STATISTIQUES DES DIFFÉRENCES ENTRE PRÉCISIONS DES POSITIONS ESTIMÉES OBTENUES POUR LES 4 STRATÉGIES D'ÉCHANTILLONNAGE INDÉPENDAMMENT DE L'INTERVALLE D'ÉMISSION DU SIGNAL. -	158 -
TABLEAU 21. ANALYSES STATISTIQUES DES DIFFÉRENCES ENTRE LES PRÉCISIONS DES POSITIONS ESTIMÉES OBTENUES POUR LES 4 STRATÉGIES D'ÉCHANTILLONNAGE EN FONCTION DES INTERVALLES D'ÉMISSION DU SIGNAL. ....	- 159 -
TABLEAU 22. ANALYSES STATISTIQUES DES DIFFÉRENCES ENTRE LES PRÉCISIONS DES POSITIONS ESTIMÉES PAR INTERPOLATION SPATIALE ET PAR POINT D'INTENSITÉ LA PLUS FORTE. ....	- 159 -
TABLEAU 23. SYNTHÈSE DES PARAMÈTRES DE FORME, D'ÉMOUSSÉ ET DE TEXTURE DE SURFACE (DAPATÉ DE BARETT, 1980) .....	- 169 -
TABLEAU 24. INDICES DE TAILLE, FORME ET D'ÉMOUSSÉ CALCULÉS PAR LA TOOLBOX DE ROUSSILLON <i>ET AL.</i> (2009) .....	- 171 -
TABLEAU 25. VALEURS ET IMAGES DES GALETS PRÉSENTANT LES VALEURS MINIMALES ET MAXIMALES DES INDICES DE FORMES ET D'ÉMOUSSÉ ÉTUDIÉS. ....	- 174 -
TABLEAU 26. CARACTÉRISTIQUES DES 8 EXPÉRIMENTATIONS D'ABRASION. ....	- 180 -
TABLEAU 27. RÉSUMÉ DES AVANTAGES ET LIMITES DES 3 INDICES D'ÉMOUSSÉ ÉTUDIÉS. ....	- 195 -
TABLEAU 28. CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES 4 FORMES DE PARTICULES ÉTUDIÉES. ....	- 203 -

## ANNEXES



# RÉSUMÉ THÈSE De Mathieu CASSEL

*Soutenue le vendredi 1<sup>er</sup> décembre 2017 à 14h15, salle D2.019 de l'ENS de Lyon.*

## **CARACTÉRISATION DES PARTICULES DANS LES LITS À GALETS : EXPÉRIMENTATIONS, DÉVELOPPEMENTS MÉTHODOLOGIQUES ET APPLICATIONS IN SITU.**

Les mosaïques de paysages dessinées par les cours d'eau sont le fruit de fonctionnements complexes. Ces fonctionnements sont appréhendés à divers échelles spatio-temporelles (*e.g.* bassin versant, secteurs fonctionnels, macroformes alluviales ou particules sédimentaires) décrites au sein du concept de système fluvial. Le fonctionnement des systèmes fluviaux s'établissent autour d'équilibres sédimentaires mettant en balance les flux liquides et solides. C'est pourquoi, l'état géomorphologique des cours d'eau à charge sédimentaire graveleuse peut être décrit au travers d'un prisme sédimentaire par l'observation de tendances générales à large échelles, de phénomènes plus ou moins localisés tels que l'incision, l'engravement, la migration des formes sédimentaires ou des modifications des propriétés géométriques des particules constituant la charge sédimentaire. Ainsi, la meilleure connaissance du rôle des flux sédimentaires actuels et passés dans l'état géomorphologique pour la prédiction des trajectoires hydrosédimentaires des cours d'eau, répond à des objectifs à la fois écologiques (la perméabilité de la nappe d'alluvions et de la zone hyporhéique exercent des fonctions auto-épuratrices, la faune benthique est la base de la chaîne alimentaire des écosystèmes fluviaux), politiques (liés à la gestion des risques d'inondation et d'érosion des terres ou d'ouvrages d'ingénierie) ou encore philosophiques (quel fonctionnement de référence pour quel système fluvial ? Quelle implication et quel rôle pour l'Homme dans le fonctionnement de ces systèmes anthropisés à divers degrés ?). Aussi, le développement d'outils et de méthodologie(s) pour la caractérisation des flux sédimentaires ou des processus observés en rivières constitue un axe de recherche important en constante émulsion. Les recherches que nous avons engagés sont articulées autour de trois axes interdépendants : (1) les propriétés physiques des particules sédimentaires, (2) leur mobilité et (3) leur transformation par abrasion.

Dans le cadre de ce type, nous avons cherché à lever le doute subsistant concernant le rôle de la fracturation de traceurs naturels (calcaires) équipés de transpondeurs passifs basses fréquences (PIT-tag) dans les faibles taux de retours observés sur le terrain ; et à tester l'intérêt de l'utilisation de galets synthétiques pour la conception de nouveaux traceurs équipés de transpondeurs actifs ultra hautes fréquences (a-UHF). Nous avons ensuite testé le potentiel de ces transpondeurs (a-UHF), dont les caractéristiques d'émission sont mieux adaptées que celles des PIT-tag à l'étude du fonctionnement des macroformes fluviale à l'échelle de tronçons fonctionnels, puis avons développé une méthodologie de recherche en rivière spécifique à ces nouveaux traceurs. Par ailleurs, Nous avons testé la sensibilité à divers paramètres d'entrée d'un programme de calcul d'émoussé de particules sédimentaires grossières, en avons validé son intérêt pour l'analyse (1) des relations entre évolution des indices d'émoussé et abrasion de la masse sédimentaire et (2) du fonctionnement hydrosédimentaire d'un bassin versant et avons formulé les recommandations nécessaires de respecter pour sa bonne utilisation. Enfin, nous avons cherché à comparer les influences respectives de la densité et de la forme des particules sédimentaires pendant leur transport par charriage. Ces résultats soulignent l'influence au moins aussi grande de la forme comparée à la mobilité, sur le déplacement des particules sédimentaires.

### MOTS-CLÉS :

Rivière à charge graveleuse, transport solide, charriage, charge de fond, fonctionnement hydrosédimentaire, macroforme alluviale, traçage sédimentaire, RFID, PIT tag, transpondeurs actifs, influence de la forme, mesure de l'émoussé, abrasion, mobilité de la particule